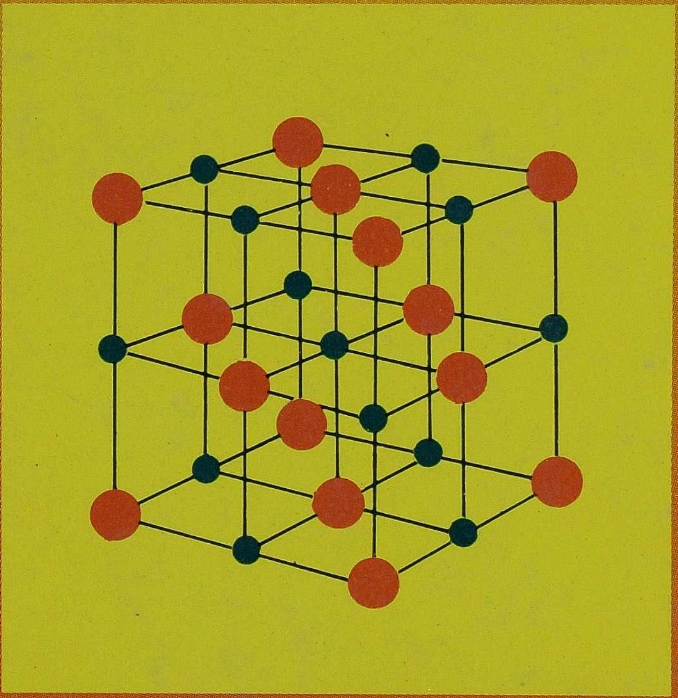
SUBSIDISED LOW COST EDITIONS
LCSE
NBT INDIA

பொருள்களின் அறிவியல்

மு. ஆறுமுகம்



ANNA UNIVERSITY
PROGRESS THROUGH KNOWLEDGE

அண்ணா பல்கலைக் கழகம்
சென்னை - 600 025

பொருள்களின் அறிவியல்

பொறியியல் பாடநூல் -2

பொருள்களின் அறிவியல்

மு. ஆறுமுகம்
உதவிப்பேராசிரியர், இயற்பியல் துறை
அண்ணா பல்கலைக்கழகம்
சென்னை - 600 025.

அண்ணா பல்கலைக்கழகம், சென்னை - 600 025

முதற் பதிப்பு

திருவள்ளுவராண்டு 2027, ஆனி மாதம் – சூலை, 1996

பதிப்புவகை : மாணவர் சலுகைப் பதிப்பு

பதிப்புரிமை : பதிவாளர், அண்ணா பல்கலைக்கழகம்
சென்னை – 600 025.

விலை ரூ. 88.00

ISBN – 81 – 85845 – 06 – 9

This book has been subsidised by the Government of India through the National Book Trust, India for the benefit of students.

தேசிய புத்தக நிறுவன நிதிச் சலுகை பெற்ற வெளியீடு

விற்பனை உரிமை : பதிவாளர், அண்ணா பல்கலைக் கழகம்,
சென்னை – 600 025

பணி ஒருங்கிணைப்பு:

வளர்தமிழ் மன்றம், அண்ணா பல்கலைக் கழகம்,
சென்னை – 600 025.

அச்சிட்டோர்:
கிளாசிக் பிரிண்டர்ஸ், சென்னை – 600 034
தொலைபேசி : 825 1648

அணிந்துரை

தற்போது தமிழகத்தில் பொறியியற் கல்லூரிகளும், பல்தொழில் நுட்பப் பயிலகங்களும் நிரம்பி வழிகின்றன. பொறியியற் பாடங்களையும், தொழில் நுட்பப் பாடங்களையும் பயிலுகின்ற மாணவர்கள் அவற்றைத் தமிழில் பயில வேண்டும் என்பதை வலியுறுத்தி வருவதற்குக் காரணம், தமிழறிவு வளர வேண்டும் என்பதைவிட, மாணவர்களின் அறிவு ஆற்றல் எளிதில் விரைவாக வளர வேண்டும் என்பதுதான்! 1991-ஆம் ஆண்டில் தமிழக அரசு பொறியியற் பாட நூல்களைத் தமிழில் வெளியிடும் பொறுப்பினை அண்ணா பல்கலைக் கழகத்திற்குப் பணித்து, அதற்கென நிதி ஒதுக்கீடும் செய்தது. இத்திட்டத்தின் வாயிலாக, அண்ணா பல்கலைக் கழகத்தின் பாடநூல் வரிசையில் `பொருள்களின் அறிவியல் (Materials Science)' என்னும் இந்நூல் இரண்டாம் நூலாய் வெளிவருகிறது.

பொருள்களின் அறிவியல், பல்வேறு பொறியியல் துறைகளுக்கும் பொதுவாய ஓர் அடிப்படை நூலாகும். இது பொறியியற் கல்வியின் தொடக்கக் கட்டத்திலேயே கற்கப்பட வேண்டியதொன்றாகும். பொருள்களின் அறிவியல் என்ற இப்பொறியியற் பாடம், பல்வேறு பொறியியற் பொருள்களின் பண்புகள், அவற்றின் செயல்திறன், செயல்திறன் மிக்க பொருள்களை உருவாக்கும் முறைகள் போன்றவற்றை விளக்குவதாகும்.

பொறியியற் கல்விப் பணியில் இருபது ஆண்டுகளாக ஈடுபட்டிருக்கும் பேராசிரியர் மு. ஆறுமுகம் அவர்கள் எழுதியுள்ள இந்நூல் மாணவர்களுக்கு நன்கு பயன்தரும் வகையில் எளிய நடையில் எழுதப் பெற்றுள்ளது. ஏற்கனவே ஆங்கிலத்தில் பலபொறியியற் பாடநூல்களை எழுதியுள்ள ஆசிரியருக்கு, இந்நூல் மேலும் பெருமை தரும் என்பது திண்ணம். இந்நூலில் விளக்கப்பட்டக் கருத்துகளை மாணவர்கள் தெளிவாகவும், விரைந்துபடித்துணரவும் ஏராளமான விளக்கப்படங்கள் தரப்பட்டுள்ளன. ஒவ்வொரு அத்தியாயத்தின் இறுதியிலும் மேற்கோள் நூற்பட்டியல் இணைக்கப்பட்டுள்ளது. மேலும் பல அறிவியல் தமிழ்ச் சொற்கள் உருவாக்கப்பட்டு. அவற்றிற்குரிய ஆங்கிலச் சொற்களும் ஆங்காங்கே அடைப்புக் குறிகளுக்குள் தரப்பட்டுள்ளன.

இந்நூலின் பதின்மூன்று அத்தியாயங்களில் கூறப்பட்ட அனைத்துக்கருத்துகளும் தெளிவாக நன்முறையில் விளக்கப்பட்டுள்ளன. புதுமைப் பொறியியற் பொருள்களாய திரவப்படிகங்கள், மீக்கடத்திகள் போன்றவற்றின் பண்புகளும், பயன்பாடுகளும் மற்றும் லேசர், குறைகடத்திக் கருவிகள் போன்றவற்றின் கருத்தியல்களும் இந்நூலைப்படிப்போர் மனதில் எளிதில் பதியும் படி எழுதப் பெற்றுள்ளன. மொழிநடை சீராகவும், எளிமையாகவும் இருப்பது இந்நூலுக்கு

மேலும் சிறப்பைத்தருகிறது. அண்ணா பல்கலைக் கழகத்தின் பொறியியல் பாடநூல் வரிசையின் இரண்டாம் வெளியீடாய இந்நூல் மாணவர்களிடையே பெரும் வரவேற்பைப் பெறும் என நம்புகிறேன்.

தொடர்ந்து பல சிறந்த பொறியியற் பாட நூல்களை அண்ணா பல்கலைக்கழகம் விரைவில் தமிழில் வெளியிடவிருக்கிறது என்பதை மகிழ்வுடன் தெரிவித்துக் கொள்கிறேன். தாய்மொழிக் கல்வியே நாட்டின் வளமான எதிர்காலத்திற்கு ஏற்ற அடித்தளம் என்பதனை உணர்ந்த அறிவியல், பொறியியல், தொழில் நுட்பத்துறை அறிஞர்களும், ஆசிரியர்களும் இப்பணியில் தாமாகவே முன்வந்து ஈடுபட்டால் அண்ணா பல்கலைக்கழகம் வரவேற்று ஒத்துழைப்பு நல்குமெனத் தெரிவித்துக் கொள்கிறேன்.

சென்னை - 25
12-3-96.

பேராசிரியர் மு. **ஆநந்த கிருட்டிணன்**
துணைவேந்தர்
அண்ணா பல்கலைக்கழகம்.

பதிப்புரை

"வெளியுலகில், சிந்தனையில் புதிது புதிதாக
விளைந்துள்ள எவற்றினுக்கும் பெயர்களெலாங்கண்டு
தெளிவுறுத்தும் படங்களொடு சுவடியெலாம் செய்து
செந்தமிழைச் செழுந்தமிழாய்ச் செய்திடவும் வேண்டும்"

– என்பது பாவேந்தர் பாரதிதாசனாரின் கனவு.

அவர்கண்ட கனவு நனவாகும் வண்ணம் இன்று அண்ணா பல்கலைக் கழகம் பொறியியல், தொழில்நுட்பப்பாட நூல்களைத்தமிழில் வெளியிட்டு வருகிறது. அந்த வகையில் `பொருள்களின் அறிவியல்' என்னும் இந்நூல் அண்ணா பல்கலைக் கழகத்தின் இரண்டாவது வெளியீடாகும்.

நாளுக்கு நாள் வெகுவிரைவாக முன்னேறி வரும் இவ்வுலகில் பொறியியலில் வளர்ச்சி பெறாத எந்த ஒரு நாடும் பின்தங்கிய நாடாகத்தான் கருதப்படும். பொறியியல் வளர்ச்சி பற்றித்திறம்பட அறிந்து, அதில் மேலும் சிந்தனையை வளர்த்து, புத்தம் புதிய திறன் மிக்க பொருள்களையும், வடிவமைப்புகளையும் உருவாக்குவதற்கானச் சிறந்த சாதனம் தாய் மொழி வழிக் கல்வியே என்பதில் கருத்து வேறுபாடு ஏதும் இருக்க முடியாது. எனவே தாய்மொழி வழிப் பொறியியற் கல்விப்பயிற்சி ஓர் இன்றியமையாததாகும். இதற்கிணங்க பொறியியல் பட்டக் கல்வியையும், பட்டயக் கல்வியையும் தமிழில் பயிற்றுவிக்க வேண்டும் என்பது நமது அரசின் குறிக்கோளாகும். இதற்கெனத் தனியே நிதியொதுக்கீடு செய்து, அனைத்துப் பல்கலைக் கழகங்களும் தத்தம் வரையறைக்குட்பட்ட பாடங்களுக்குத் தமிழில் பாடநூல் வெளியிடவேண்டும் எனத் தமிழக அரசு ஆணையிட்டது. அவ்வாணையில் அண்ணா பல்கலைக் கழகம் தமிழில் பொறியியற் பாட நூல்களை வெளியிட வேண்டுமெனப் பணித்தது. இப்பணியைத்தடையின்றி நிறைவேற்ற அண்ணா பல்கலைக்கழகமும் ஒரு வல்லுநர் குழுவை அமைத்து, ஆசிரியப் பெருமக்களைத் தமிழில் பொறியியற் பாட நூல்கள் எழுத வேண்டுகோள் விடுத்தது. தமிழார்வம் கொண்டப் பல பொறியியல் வல்லுநர்கள், ஆசிரியர்கள் தமிழில் பாட நூல்களை எழுத முன்வந்தனர். அவ்வகையில் சென்ற ஆண்டு இறுதியில் பேராசிரியர் அ. இளங்கோவன் அவர்கள் எழுதிய `திண்மவிசையியல்' என்னும் பாடநூலைத் தமிழில் அண்ணாபல்கலைக் கழகம் வெளியிட்டது. தற்போது பேராசிரியர் மு. ஆறுமுகம் அவர்கள் தமிழில் எழுதிய `பொருள்களின் அறிவியல்' என்னும் பாடநூலை வெளியிடுகிறது.

இந்நூலின் எழுத்தமைப்புப் பணியைச் செவ்வனே செய்திட்ட அடையார் மாணவர் நகலகத்தினருக்கும், நூலை நன்முறையில் அச்சிட்டு வெளிக்கொணரப்பல நற்கருத்துக்களை நல்கிய அண்ணா பல்கலைக்கழக

நூல்வெளியீட்டு வல்லுநர் குழுவிற்கும், அச்சுப் பொறியியல் துறைப் பேராசிரியர் நா. சங்கர நாராயணன் அவர்களுக்கும் நன்றி. இப்பணியினைச் சிறந்த முறையில் விரைந்து முடித்திட அனைத்து வகையிலும் துணைநின்று ஆற்றுப் படுத்தியதோடு, இந்நூலுக்கு அணிந்துரையும் வழங்கியுள்ள அண்ணா பல்கலைக்கழகத் துணைவேந்தர் முனைவர். மு. ஆநந்த கிருட்டிணன் அவர்களுக்கு எனது மனமார்ந்த நன்றியைத் தெரிவித்துக் கொள்கிறேன். மேலும் இந்நூலாக்க முயற்சியில் துணைநின்ற அனைத்துப் பெருமக்களுகளுக்கும் நன்றி. இப்பணியைச் சீரிய முறையில் நிறைவேற்றிய அண்ணா பல்கலைக்கழக வளர்தமிழ்மன்றப் பிரிவின் பொறுப்பாளர் பேராசிரியர் அ. இளங்கோவன் அவர்களுக்கு நன்றியைச் செலுத்துதலோடு, அப்பிரிவின் தனி அலுவலர்களான திருவாளர்கள் மு. கண்ணன், ப. இராமலிங்கம் ஆகியோரின் கடமையுணர்வைப் பாராட்டுகிறேன்.

இந்நூல் வெளியிடுவதற்கு நிதி உதவி நல்கிய தமிழக அரசிற்கு மிக்க நன்றி. மேலும் மலிவுவிலையில் இந்நூலை வெளியிட அச்சுச் செலவு மதிப்பீட்டில் 50 விழுக்காடும், நூலாசிரியருக்கு 20 விழுக்காடு மதிப்பூதியமும் தர வழங்காணை பிறப்பித்துள்ள இந்திய தேசீய புத்தக அறக்கட்டளைக்கு நன்றியைத் தெரிவித்துக் கொள்கிறேன்.

பொறியியற் பாடநூல்களைத் தமிழில் வெளியிடும் அண்ணா பல்கலைக்கழகத்தின் இப்பணிக்கு ஊக்கம் தரும் வகையில் தமிழில் புலமை மிக்கப் பொறியியல் அறிஞர்களின் நல்லாதரவையும், பல நிறுவனங்களின் ஒத்துழைப்பையும் வேண்டுகிறேன். இத்தகைய கூட்டு முயற்சியால் மேலும் பல பொறியியற் பாடநூல்கள் விரைவில் வெளியிடப்பட வாழ்த்துகிறேன்.

சென்னை - 25
25-3-96.

பேராசிரியர் **இரா. செகதீசன்**
பதிவாளர்
அண்ணா பல்கலைக்கழகம்.

முகவுரை

'பொருள்களின்அறிவியல்' என்பது பொறியியற் பொருள்களின் கட்டமைப்புகள், பண்புகள் பற்றிக் கூறுவதோடு, அப்பொருள்கள் பயன்பாட்டில் இருக்கும்போது அவை திறம்பட வேலை செய்ய கட்டமைப்புகளும், பண்புகளும் எவ்வகையில் உதவி செய்கின்றன என்பது பற்றியும், செயல்திறன் மிக்க பொருள்களை எங்ஙனம் உருவாக்குவது என்பது பற்றியும் கூறும் ஒரு பொறியியற் பாடமாகும். உலகம் முழுவதும் தற்போது இப்பாடம் பல பல்கலைக்கழகங்களில் பொறியியற் பட்டப்படிப்பில் ஒரு முக்கிய பாடமாக ஏற்றுக் கொள்ளப்பட்டுள்ளது. தொழிற்கூடங்களில் பொறியியல் வல்லுநராய் வேலை கிடைக்க பொருள்களின் அறிவியல் பற்றி நன்கு தெரிந்திருப்பது அவசியமாகும். பல்தொழில்நுட்பங்களும், செயல்முறைகளும் உருவாக பொருள்களின் அறிவியல் மிகவும் தேவையானதொன்றாகும். மேலும் நீண்டகாலம் பயன்பாட்டில் இருக்கும் திறன்மிக்க, வலுவான பொறியியற் பொருள்களை உருவாக்கப் பொருள்களின் அறிவியல் பற்றித் தெரிந்திருக்க வேண்டும். எனவே பொருள்களின் அறிவியல் என்பது பொதுவியல், மின்னியல், மின்னணுவியல், எந்திரவியல், கணிப்பொறியியல், கருவியியல் போன்ற அனைத்து பொறியியற் துறைகளுக்கும் பொதுவான ஒரு பாடமாகும்.

பொருள்களின் அறிவியல் என்னும் இப்பாடநூல் அனைத்து பொறியியற் கல்லூரி மாணவர்களுக்கும், பல்தொழில்நுட்பப் பயிலக மாணவர்களுக்கும் பயன் தரும் வகையில் அவர்களின் பாடத்திட்டத்தை அடிப்படையாக வைத்து எழுதப் பெற்றுள்ளது. ஆங்கிலவழி கல்வி பயிலும் மாணவர்களும் இந்நூலை எளிதில் படித்து பயன்படும் வகையில், அறிவியல் தமிழ்ச் சொற்களுக்கு நூலில் ஆங்காங்கே அவற்றிற்குரிய ஆங்கிலச் சொற்கள் அடைப்புக் குறிகளுக்குள் தரப்பட்டுள்ளன. மேலும் நூலின் இறுதியில் அறுநூற்றுக்கும் மேற்பட்ட அறிவியல் தமிழ்ச் சொற்களுக்குரிய ஆங்கிலச் சொற்கள், அகர வரிசைப்படுத்திப் பட்டியல் போட்டுத் தரப்பட்டுள்ளன. இந்நூல் தன்னகத்தே பதின்மூன்று அத்தியாயங்களைக் கொண்டது. ஒவ்வோர் அத்தியாயத்திலும், அதில் கூறப்பட்ட கருத்துக்களை முதலில் மேலோட்டமாகத் தெரிந்து கொள்ள அறிமுகம் கொடுக்கப்பட்டுள்ளது. நூலில் விளக்கப்பட்ட கருத்துகள் மாணவர்கள் மனதில் நன்கு பதிய, இரு நூற்றுக்கும் மேற்பட்ட படங்கள் வரையப்பட்டிருப்பதுடன், ஒவ்வொரு அத்தியாயத்தின் இறுதியில் மாதிரிக்கணக்குகளும், அத்தியாயத்தின் சுருக்கமும், வினாக்களும் கொடுக்கப்பட்டுள்ளன. மாணவர்கள் மேலும் படித்து தமது சிந்தனையை வளர்த்துக் கொள்ள ஒவ்வொரு அத்தியாயத்தின் இறுதியில் மேற்கோள் நூற்பட்டியல் இணைக்கப்பட்டுள்ளது. ஏற்கனவே ஆங்கிலத்தில் பொருள்களின் அறிவியல் சார்ந்த பல நூல்கள் வெளிவந்திடினும், இந்நூலே பொருள்களின் அறிவியலில் வெளிவரும் முதல் தமிழ் நூலாகும்.

ஆசிரியரின் இருபது ஆண்டு கால ஆசிரியப் பணியிற்கிடைத்த பயிற்சியையும், பதினைந்து ஆண்டுகால பொருள்களின் அறிவியல் பற்றிய ஆய்வுகளையும்

அடிப்படையாய் கொண்டு இந்நூல் எழுதப்பட்டுள்ளது. எனவே ஒவ்வொரு கருத்தும், மாணவர்கள் மனதில் எளிதில் பதியும்படி எளிமையாகவும், சீராகவும் எழுதப்பட்டுள்ளது. முக்கியத்துவம் வாய்ந்த குறைகடத்திக்கருவிகள், மின்கடத்தாப் பொருள்கள், மீக்கடத்திகள் மற்றும் லேசர்கள் போன்றவற்றின் கருத்தியல்கள் தெள்ளிய நீரோடை போல் விளக்கப்பட்டுள்ளன.

பொறியியற் கல்லூரிமாணவர்களுக்கு மட்டுமின்றி, கலைக்கல்லூரி இளமறிவியல் பட்டப்படிப்பு மாணவர்களுக்கும், முது அறிவியல் (இயற்பியல்) பட்டப்படிப்பு மாணவர்களுக்கும், பொருள்களின் அறிவியலில் ஆய்வு மேற்கொள்வோர்க்கும் இந்நூல் ஓர் அரிய நூலாகும். தமிழில் இப்பாடத்தைப் பயிற்றுவிக்கும் கல்லூரி ஆசிரியர்களுக்கும் இஃது ஒரு வழிகாட்டியாகும்.

'இறவாத புகழுடைய புது நூல்கள்
தமிழ்மொழியில் இயற்றல் வேண்டும்'

என்று பாடிய பாரதியின் கனவை நனவாக்க இந்நூல் மலர்ந்துள்ளது. எனவேதான் ஆசிரியர், ஆங்கிலமொழியில் பல பாடநூல்களை எழுதிடினும், இந்நூல் எழுதியதைப் பெறுதற்கரியப்பேறாய் எண்ணுகிறார். தாய் மொழி வழிப்பயிற்சி ஒன்றே சிந்தனையைத் தூண்டிப் பல புதிய கண்டுபிடிப்புகளை உருவாக்கும் என்பதை மனத்திற்கொண்டு இந்நூலை எழுதும் பணியை ஆசிரியர் மேற்கொண்டார்.

இந்நூல் வெளிவருதற்குப் பொருளுதவி நல்கிய தமிழக அரசுக்கும், இந்திய தேசீய புத்தக அறக்கட்டளை (National Book Trust of India)க்கும் நன்றி நவில்தலோடு, முதலில் இந்நூலை எழுத ஊக்குவித்த தமிழ்ப் பல்கலைக்கழகத்தின் தமிழ் வளர்ச்சித்துறை இயக்குநர் முனைவர். இராம. சுந்தரம் அவர்களுக்கும், இந்நூலை வெளியிட முன்வந்த அண்ணா பல்கலைக்கழகப் பதிவாளர் அவர்களுக்கும் தனது மனம் நிறைந்த நன்றியைத் தெரிவித்துக் கொள்கிறார். மேலும் நூலில் இலக்கணப் பிழைகளைத் தவிர்த்த முனைவர் இராம. சுப்பிரமணியம், நூலாய்வு செய்த பேராசிரியர்கள் முனைவர் சி.உ. பிள்ளை, முனைவர் க. கிருட்டிண மூர்த்தி, முனைவர் அண. கண்ணப்பன், முனைவர் சி. ஞானசேகரன் ஆகியோருக்கும் நன்றியைத் தெரிவிப்பதோடு மட்டுமின்றி அவர்களின் கருத்துக்களுக்கும் நன்றி பல தெரிவிக்கின்றார். அறிவியற் தமிழ் சொல்லாக்கத்திற்கு அருந்துணை நல்கிய அண்ணா பல்கலைக்கழக இயற்பியற்துறை ஆசிரியர்களுக்கும், நூலில் அச்சுப் பிழைகளை நீக்க உதவிய திருமதி. பொற்கொடி ஆறுமுகத்திற்கும் ஆசிரியர் தமது நன்றியைத் தெரிவித்துக் கொள்கிறார். தமது முக்கிய அலுவல்களின் போதும் கூட, நூல் வெளியிடுவதற்கென்று அமைக்கப்பட்ட கூட்டங்களில் தவறாது கலந்து இந்நூல் வெளியீட்டை விரைவுப்படுத்தியதோடு, ஆசிரியரையும் ஊக்குவித்த அண்ணா பல்கலைக்கழகத் துணைவேந்தர் முனைவர் மு. ஆநந்த கிருட்டிணன் அவர்களுக்கு தமது உளமார்ந்த நன்றியைத் தெரிவித்துக்கொள்கிறார். மேலும் கல்விப் பணியில் ஈடுபடுத்தி, அறிவொளி ஏற்றிய அவரது வழிகாட்டி முனைவர் சீனு. நடராசன் அவர்களுக்கு இந்நூலைச் சமர்ப்பிக்கின்றார்.

மு. ஆறுமுகம்

பொருளடக்கம்

1. பொருள்களும் அணு அமைப்பும்

1.1 அறிமுகம்

பொறியியற்றுறையில் பயன்படும் பொருள்கள் பற்றித் தெரிந்து கொள்ள அவற்றின் இயற்பியற் குணங்களாய மின் கடத்தல், வெப்பக் கடத்தல், கடினத் தன்மை போன்றவற்றைத் தெளிவாய் அறிந்திருக்க வேண்டும். அவ்வாறு அறிந்து கொண்ட பிறகே 'ஒவ்வொரு பொருளையும் எங்கெங்குப் பயன்படுத்தலாம்?' என்னும் முடிவிற்கு வருதலோடு அப்பொருள்களை மேலும் நன்கு பயன்படுத்த ஆய்வுகள் செய்யவும் வழி பிறக்கும். இவ்வத்தியாயத்தில் பொறியியற்றுறையில் பயன்படும் சில பொருள்கள் பற்றிய அறிமுகமும், 'அவற்றை எவ்வாறு வகைப்படுத்தலாம்?' என்பது பற்றியும் தெரிவிக்கப்பட்டுள்ளன. மேலும், பொருள்கள் அணுக்களால் அமைந்துள்ளபடியால் அணுவின் அமைப்பும் சுருக்கமாய் விளக்கப்பட்டுள்ளது.

1.2. பொறியியற் பொருள்களை வகைப்படுத்தல்

பொதுவாய்ப் பொறியியற் பொருள்களை மூன்று வகையாகப் பிரிக்கலாம். முதல்வகையில் எஃகு, அலுமினியம், தாமிரம், தங்கம் போன்ற உலோகங்களும்,மாங்கனின், இன்வார் போன்ற உலோகக் கலவைகளும் உள்ளன. இரண்டாம் வகையில் ஃபெரைட்டுகள், கார்னெட்டுகள் போன்ற பீங்கான் (ceramics) பொருள்களும், சிலிக்கா, சோடாச் சுண்ணாம்பு, கண்ணாடி போன்ற கண்ணாடிப் பொருள்களும் உள்ளன. மூன்றாம் வகையில் பாலிஎத்திலின், பாலிவினைல் குளோரைடு போன்ற பிளாஸ்டிக்குகளும், டெரிலின், நைலான் போன்ற நார் இழைகளும் (fibres), இயற்கையிலும், செயற்கையிலும் கிடைக்கும் ரப்பர்களும், தோல்களும் அடங்கிய கரிம பாலிமர்களும் (organic polymers) உள்ளன. பொறியியற் பொருள்கள் தனிமங்களாயும், சேர்மங்களாயும், கலவைகளாயும் உள்ளன. பொதுவாய்ப் பொருள்கள் என்றாலே திண்ம நிலையில் உள்ள பொருள்களையே குறிக்கும், எனினும், திரவ நிலையில் உள்ள பல்வேறு அமிலங்களும், நீரும், வாயு நிலையிலுள்ள காற்று, நீராவி போன்றவைகளும் பொறியியற்றுறையில் மிகப்பெரும்பங்கு வகிக்கின்றன. நடைமுறையில் பொருள்களின் மின் பண்புகளை அடிப்படையாய் வைத்து அவற்றைக் கடத்திகள், கடத்தாப் பொருள்கள் அல்லது அரிதிற்கடத்திகள், குறைகடத்திகள், மீக் கடத்திகள் எனவும் பிரிக்கலாம். மேலும் பொருள்களின் காந்தப் பண்புகளைக் கொண்டு காந்தப் பொருள்கள், காந்தத்தன்மையற்ற பொருள்கள் எனவும், பொருள்களின் படிகத்தன்மையை அடிப்படையாய்க் கொண்ட படிக, படிகமில்லாப் பொருள்கள் (amorphous materials) எனவும் பிரிக்கலாம். பொருள்களின் இயலமைப்புகளை அறிந்து, அவற்றால் பொருள்களின் பல்வேறு பண்புகளைத்தெரிந்துகொள்ளலாம்.

இந்நூல், நடைமுறையில் பொறியியற்றுறையில் பயன்படும் பல்வேறு பொருள்களின் பண்புகளைத் தெளிவான முறையில் விளக்குகிறது.

1.3. *அணு அமைப்பு*

பொருள்கள் பல்வேறு அணுக்களின் சேர்க்கையால் உண்டாகின்றன. ஒவ்வோர் அணுவும் உட்கருவையும் (nucleus), அதனைச் சுற்றிவரும் எலெக்ட்ரான்களையும் கொண்டுள்ளது. உட்கருவில் புரோட்டான்களும், நியூட்ரான்களும் உள்ளன. நியூட்ரான்களில் மின்னூட்டம் ஏதும் இராது. மற்றும் நியூட்ரான் புரோட்டானைவிட நிறையில் 0.0023×10^{-27} கிலோ கிராம் அளவு கூடுதல் மதிப்பினைப்பெற்றுள்ளது. புரோட்டான்கள் அனைத்தும் நேர்மின்னேற்றம் உடையன. அதனால் உட்கரு நேர்மின்னேற்றம் கொண்டுள்ளது. உட்கருவினைச் சுற்றிவரும் எலெக்ட்ரான்கள் எதிர்மின்னேற்றம் கொண்டுள்ளன. ஓர் அணுவிலுள்ள மொத்த எதிர் மின்னூட்டங்களும் நேர்மின்னூட்டங்களும் சமமாயுள்ளன. அதனால், அணு மின்நடுநிலையிலுள்ளது. புரோட்டான் அல்லது எலெக்ட்ரான் கொண்டுள்ள மின்னூட்ட மதிப்பு 1.602×10^{-19} கூலம் ஆகும். இதுவே அடிப்படை மின்னூட்ட மதிப்பாகும். அணுவின் நிறை அதிலுள்ள புரோட்டான், நியூட்ரான்களின் மொத்த எண்ணிக்கையால் தீர்மானிக்கப்படுகிறது. இதில் எலெக்ட்ரான்களின் பங்கினை எடுத்துக் கொள்வதில்லை. ஏனெனில், எலெக்ட்ரானின் நிறை, மிகவும் குறைவாயும், புறக்கணிக்கத்தக்க அளவிலும் உள்ளது.

1.4. *கவள நிலைகள் அல்லது குவாண்டம் நிலைகள்* (Quantum states)

ஓர் அணுவின் உட்கருவைச் சுற்றியுள்ள எலெக்ட்ரான்கள், குறிப்பிட்ட கவளநிலைகளில் அமர்ந்து, உட்கருவினைச் சுற்றி வருகின்றன. **ஹைஸன்பர்க்கின் நிச்சயமின்மைத் தத்துவப்படி** (uncertainty principle) ஓர் எலெக்ட்ரானின் இருப்பிடத்தையும், அதன் உந்தத்தையும் ஒரே நேரத்தில் சரியாய்க் குறிப்பிட்டுச் சொல்லமுடியாது. உதாரணமாய் எலெக்ட்ரான் உந்தத்தின் நிச்சயமின்மையின் அளவு Δp எனவும், இருப்பிடத்தின் நிச்சயமின்மையின் அளவு Δx எனவும் கொண்டால் அவற்றின் பெருக்கற்பலனின் மதிப்பு, எப்பொழுதும் $\frac{h}{4\pi}$ க்கு அதிகமாகவோ, சமமாகவோ இருக்கும். அஃதாவது,

$$\boxed{\Delta p \, \Delta x \geq \frac{h}{4\pi}}$$

இதில் h என்பது பிளாங்க் மாறிலி. இத்தத்துவத்தினால் நாம், ஓர் அணுவிலுள்ள எலெக்ட்ரான் செல்லும் பாதையை உட்கருவினைச் சுற்றியுள்ள தனிப்பாதை என எடுத்துக்கொள்ளமுடியாது. அதற்குப் பதிலாய் அப்பாதையை உட்கருவினைச்சுற்றி, எலெக்ட்ரான் இருப்பதற்குரிய நிகழ்திற அடர்த்தியைக் காட்டும் திரள் (cloud) என கொள்ளலாம். அணுவில் இருக்கும் எலெக்ட்ரான் ஒவ்வொன்றினையும் ஒரு கவள நிலையில் இருத்தலாம். ஒவ்வொரு கவள நிலையும் n, l, m_l, m_s ஆகிய கவளஎண்களால்

(quantum numbers) குறிப்பிடப்பட்டுள்ளது. கவளக் கொள்கையின்படி ஓர் அணுவிலுள்ள ஒவ்வோர் எலெக்ட்ரானுக்கும் குறிப்பிட்ட கவள எண் தொகுதி ஒதுக்கப்பட்டுள்ளது. இக்கவள எண்கள் அணுவிலுள்ள எலெக்ட்ரானின் நிலைமையை வரையறுப்பவையாகும். **பௌலியின் தவிர்க்கைத் தத்துவப்படி** 'ஒரே நிலைமையில் இரண்டு எலெக்ட்ரான்கள் ஓர் அணுவில் இருக்க முடியாது'. அஃதாவது, ஓர் அணுவிலுள்ள எவையேனும் இரண்டு எலெக்ட்ரான்களை வரையறுக்கும் கவள எண்கள் அனைத்தும் ஒன்றனுக்கொன்று சமமாயிருக்க முடியாது. இக்கவள எண்களில் முதலாவதாய்ச் சொல்லப்படுவது எலெக்ட்ரானின் சுற்றுப் பாதையைக் குறிக்கும் **முதன்மைக் கவள எண்** (principal quantum number) 'n' ஆகும். எலெக்ட்ரானின் சுற்றுப்பாதையைக் 'கூடு' (shell) என்றும் கூறுவர். $n = 1, 2, 3, 4, ...$ என்ற கவள எண்களுக்குரிய கூடுகளை முறையே 'K, L, M, N . . . கூடுகள்' என்பர். n -ன் மதிப்பு மிக அதிகமாயிருக்கும் போது அந்த மதிப்பையுடைய கூடு, அணு உட்கருவிலிருந்து மிகத்தொலைவில் இருக்கும். இரண்டாவதாய்ச் சொல்லப்படும் **கோண உந்தக் கவள எண்** (angular momentum quantum number) 'l' எலெக்ட்ரானின் கோண உந்தத்தை வரையறுப்பதாகும். இஃது எலெக்ட்ரானின் உட்கூடு (orbital) அமைப்போடு தொடர்பு கொண்டுள்ளது. எலெக்ட்ரானின் கோண உந்தமான 'L' - ஐ $L = \sqrt{l(l+1)}\frac{h}{2\pi}$ என்னும் சமன்பாடு கொடுக்கும். குறிப்பிட்ட 'n' மதிப்பிற்கு 'l' ஆனது $0, 1, 2, 3, ...(n-1)$ என்னும் மதிப்புகளை ஏற்கலாம். $l = 0, 1, 2, 3, 4,.....$ என்னும் கவள எண்களுக்குரிய உட்கூடுகளை s-உட்கூடு, p- உட்கூடு, d-உட்கூடு, f- உட்கூடு, g-உட்கூடு . . . என்று கூறுவர். மூன்றாவதாய்ச் சொல்லப்படுவது **காந்தக் கவள எண்** (magnetic quantum number) 'm_l' ஆகும். இஃது உட்கருவினைச் சுற்றி எலெக்ட்ரான் இருப்பதற்குரிய நிகழ்திற அடர்த்தியைக் காட்டும் திரள், வெளியில் (space) நிலைகொண்டுள்ள திசையை வரையறுப்பதாகும். z-அச்சில் எலெக்ட்ரானின் கோண உந்தத்தின் கூறை வரையறுக்கவும் இது பயன்படுகிறது. இதனைப் பின்வருமாறு எழுதலாம்.

$$L_z = m_l \frac{h}{2\pi}$$

m_l ஆனது $-l$முதல் $+l$ வரையிலான முழுஎண் மதிப்புகளை ஏற்கலாம். அஃதாவது,

$$m_l = -l, -(l-1), -(l-2) \ldots -1, 0, +1 \ldots (l-1), l$$

ஆகலாம். இவ்வாறாய் m_l ஆனது $(2l+1)$ மதிப்புகளை ஏற்கலாம். நான்காவதாய்ச் சொல்லப்படுவது **தற்சுழற்சி கவள எண்** (spin quantum number) 'm_s' ஆகும். எலெக்ட்ரானின் தற்சுழற்சியால் ஏற்படும் கோண உந்தம் ஒரு குறித்த திசையில் உள்ளதா அல்லது அதற்கு எதிர் திசையில் உள்ளதா என்பதனை 'm_s' குறிக்கிறது. m_s ன் மதிப்பு $+\frac{1}{2}$ (மேல் நோக்கிய தற்சுழற்சி) அல்லது $-\frac{1}{2}$ (கீழ்நோக்கிய தற்சுழற்சி) ஆகும்.

பௌலியின் தவிர்க்கைத் தத்துவப்படி ஒரு கவள நிலையில் ஒரேயோர் எலெக்ட்ரான் தான் இருக்கமுடியும். அணுக்கருவினைச் சுற்றிப் பல்வேறு கவள நிலைகளில் எலெக்ட்ரான்கள் உள்ளன. அணுவின் மிகக் குறைந்த ஆற்றல் நிலையைத் ***'தரை நிலை'*** (ground state) என்பர். அதில் எலெக்ட்ரான்கள், பௌலியின் தவிர்க்கைத் தத்துவத்தை மீறாமல் மிகக்குறைந்த ஆற்றல் நிலைகளில் இருக்கும். உட்கூடுகளில் ஆற்றல் உயர்ந்து கொண்டு செல்வதனை வைத்துப் பின்வருமாறு வரிசைப்படுத்தி எழுதலாம்.

$1s$

$2s \quad 2p$

$3s \quad 3p$

$4s \quad 3d \quad 4p$

$5s \quad 4d \quad 5p$

$6s \quad 4f \quad 5d \quad 6p$

இதில் எண்கள் அனைத்தும் முதன்மைக் கவள எண்களைக் குறிக்கின்றன. ஆங்கில எழுத்து ஒவ்வொன்றும் குறிப்பிட்ட உட்கூட்டைக் குறிக்கிறது. வெளியிலிருந்து ஆற்றல் உட்செலுத்தப்படும்போது ஓர் எலெக்ட்ரான் கிளர்ச்சியடைந்து, குறைந்த ஆற்றல் மட்டத்திலிருந்து காலியாயுள்ள உயர்ஆற்றல் மட்டத்திற்குச் செல்லமுடியும். இவ்வாறு எலெக்ட்ரான் இடப்பெயர்வு (transition) நடைபெறும்போது குறிப்பிட்ட அதிர்வெண் உடைய மின்காந்தக் கதிர்வீச்சு உட்கிரகிக்கப்படும்; அல்லது வெளிவிடப்படும். ஆற்றல் உட்கிரகிக்கப்படும்போது எலெக்ட்ரான் தாழ் ஆற்றல் மட்டத்திலிருந்து உயர்ஆற்றல் மட்டத்திற்குச் செல்லும். ஆற்றல் வெளிவிடும் போது எலெக்ட்ரான் உயர்ஆற்றல் மட்டத்திலிருந்து தாழ் ஆற்றல் மட்டத்திற்கு வரும். தொடக்க ஆற்றல் மட்டம் E_1, இறுதி ஆற்றல் மட்டம் E_2 எனில், வீசப்படும் அல்லது உட்கிரகிக்கப்படும் கதிர்வீச்சின் அதிர்வெண், ν ஐ

$$h\nu = E_2 \sim E_1$$

என்னும் சமன்பாடு தரும்.

1.5. *தனிம அட்டவணை*

1869 – ஆம் ஆண்டு வேதியியல் பண்புகளில் காணப்படும் ஒற்றுமைகளை அடிப்படையாய்க்கொண்டு ***'மெண்டலீப்*** என்பவர் தனிமங்களின் அட்டவணையை வகுத்தார். தனிம அட்டவணையில் அணு எண்ணானது, (அஃதாவது அணுவிலுள்ள புரோட்டான்களின் எண்ணிக்கை) ஹைட்ரஜனில் தொடங்கி ஒவ்வொன்றாய் உயர்ந்து கொண்டே செல்கிறது. எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கையும் அதேபோல் ஒவ்வொன்றாய் உயர்கிறது. தனிம அட்டவணையில் உள்ள தனிமங்களின் அமைப்பினைத் தெரிந்துகொள்ளுமுன்ப 'எலெக்ட்ரான்கள் கூடுகளில் எவ்வாறு நிரம்புகின்றன?'

என்பதனைச் சிறிது கவனிப்போம். K–கூட்டிற்கு முதன்மைக் கவள எண், $n = 1$. எனவே $l = 0, m_l = 0; m_s = \pm\frac{1}{2}.$ அதனால் K- கூட்டில் பௌலியின் தவிர்க்கைத் தத்துவத்திற்கு முரண்பாடில்லாமல் $(1, 0, 0, \frac{1}{2})$, $(1, 0, 0, \frac{-1}{2})$ என்னும் கவள எண் தொகுப்புகளைக் கொண்ட இரண்டே இரண்டு எலெக்ட்ரான்கள்தான் அமைய இயலும். இதேபோல் 'L' கூட்டில் பெருமமாய் 8 எலெக்ட்ரான்களும் 'M' கூட்டில் பெருமமாய் 18 எலெக்ட்ரான்களும் அமைய இயலும்.

'K' கூட்டின் 's' உட்கூட்டில் ஓர்எலெக்ட்ரான் உள்ளது என்பதை $1s^1$ என்றும் அதே உட்கூட்டில் இரண்டு எலெக்ட்ரான்கள் இருந்தால் அவை $1s^2$ என்றும் குறிக்கப்படும். 'L' கூட்டின் 'p' உட்கூட்டில் உள்ள எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை ஒன்று, இரண்டு, மூன்று, ... என்பவை முறையே $2p^1, 2p^2, 2p^3$, ... என்று குறிக்கப்படும்.

அட்டவணை 1.1 இல் சில தனிமங்களிலுள்ள எலெக்ட்ரானிய நிலையமைப்புக் காட்டப்பட்டுள்ளது. தனிம அட்டவணையின் ஒவ்வொரு தொகுதியின் (row) முடிவிலும் வேதியியல் மாற்றத்தில் பங்கெடுக்க விழையா மந்தவாயு (inert gas) உள்ளது. பெரும்பாலும் இவ்வகை வாயுக்களில் எலெக்ட்ரான் திரள், கோளச்சமச்சீரை உடையதாயுள்ளது.

அட்டவணை 1.1

சில தனிமங்களில் எலெக்ட்ரானிய நிலையமைப்பு

இடுகுறி	தனிமம்	அணு எண்	எலெக்ட்ரானிய நிலையமைப்பு
He	ஹீலியம்	2	$1s^2$
N	நைட்ரஜன்	7	$1s^2 2s^2 2p^3$
Na	சோடியம்	11	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$
Cl	குளோரின்	17	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5$
V	வனாடியம்	23	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^3 4s^2$
Cr	குரோமியம்	24	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^5 4s^1$
Fe	இரும்பு	26	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^6 4s^2$
Ni	நிக்கல்	28	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^8 4s^2$
Cu	தாமிரம்	29	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^1$
Zn	துத்தநாகம்	30	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2$

இதே போல் 's' உட்கூட்டை எடுத்துக்கொண்டால் அதிலும் எலெக்ட்ரான் இருப்பதற்குரிய நிகழ்திறனைக் காட்டும் திரளின் அமைப்புக் கோளச் சமச்சீர் உடையதாகத் தெரிகிறது. எனினும், அக்கோளத்தின் மத்தியில் எலெக்ட்ரான் திரள் அடர்த்தியாயும் மத்தியிலிருந்து வெளியே செல்லச்செல்ல எலெக்ட்ரான் திரள் அடர்த்தி குறைந்தும் காணப்படுகின்றன. ஆனால், *p* உட்கூட்டில், எலெக்ட்ரான் திரள் கோளச் சமச்சீர் உள்ளதாயில்லை. ஒவ்வொரு p_x, p_y, p_z உட்கூடுகளிலும் எலெக்ட்ரான் அடர்த்தி முறையே *x,y,z* ஆகிய அச்சுகளுக்கு இணையாயுள்ள திசைகளில் மிகுதியாயுள்ளது.

ஹண்டு விதிப்படி (Hund's rule) எலெக்ட்ரான் - எலெக்ட்ரான் எதிர்ப்பு ஆற்றலைக் குறைக்க வேண்டி, p,d அல்லது f நிலைகளில் ஒரே திசையில் தற்சுழற்சிகளையுடைய எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை பெருமமாயிருக்கும். உதாரணமாய் நைட்ரஜன் அணுவை எடுத்துக்கொண்டால், '*p*' உட்கூட்டில் மூன்று எலெக்ட்ரான்கள் உள்ளன. அவைகள் p_x, p_y, p_z ஆகிய உட்கூடுகளில் ஒவ்வொன்றிலும் ஒன்றாகச் சமமாய்ப் பகிர்வு செய்யப்படுவதால் இம்மூன்று எலெக்ட்ரான்களும் ஒரே திசையில் தற்சுழற்சிகளைக் கொண்டிருக்கின்றன. தனிம அட்டவணையில் முதல் தொகுதியில் இருதனிமங்களும், இரண்டாம் தொகுதியில் எட்டுத்தனிமங்களும், மூன்றாம் தொகுதியில் எட்டுத்தனிமங்களும், நான்காம் தொகுதியில் பதினெட்டுத் தனிமங்களும் உள்ளன. குரோமியம், தாமிரம் ஆகியவற்றில் ஹண்டு விதிப்படி எலெக்ட்ரான் நிலையமைப்பு உள்ளதை அட்டவணை 1.1. காட்டுகிறது. 4p உட்கூடுகள் நிரம்பிய தனிமங்கள் தனிம அட்டவணையில் ஐந்தாம் தொகுதியிலும், 4f மற்றும்5f உட்கூடுகள் நிரம்பிய தனிமங்கள் தனிம அட்டவணையில் ஆறு, ஏழு தொகுதிகளிலும் உள்ளன. அரைகுறையாய் நிரப்பப்பட்ட f உட்கூடுகளையுடைய தனிமங்களை அருமண் தனிமங்கள் (rare earth elements) என்பர். தனிம அட்டவணையில் ஆறாம் தொகுதியில் 32 தனிமங்கள் உள்ளன. ஏழாம் தொகுதி, தனிம அட்டவணையில் கடைசிவரை நீண்டுள்ளது. அணுக்கருவைச் சுற்றியுள்ள உட்கூடுகளிலுள்ள எலெக்ட்ரான்கள், ஆற்றலை உட்கொண்டு உயர் ஆற்றல் மட்டங்களுக்குச் செல்ல முடியும். வெளி உட்கூட்டிலுள்ள ஓர் எலெக்ட்ரான், தேவையான அளவு ஆற்றலை உட்கொண்டு அணுவிலிருந்து முழுமையாய் விடுபட்டுக் கட்டற்ற எலெக்ட்ரானாய் மாற முடியும். இவ்வாறு ஓர்எலெக்ட்ரானை ஓர் அணுவிலிருந்து விடுவிக்கத்தேவையான குறைந்த மதிப்புள்ள ஆற்றலை '**அயனியாக்க ஆற்றல்**' (ionization energy) என்பர். அணுவில் கடைசி உட்கூட்டிலுள்ள எலெக்ட்ரான் வலுவில்லாமல் கட்டுண்டிருக்கும். அதனை அணுவிலிருந்து விடுவிக்கத் தேவையான ஆற்றல், 'முதல் அயனியாக்க ஆற்றல்' (first ionization energy) எனப்படும். தனிம அட்டவணையில் ஒவ்வொரு தொகுதியின் முதலிலுள்ள தனிமத்தின் அணுவிற்கு அயனியாக்க ஆற்றல் மதிப்பு மிகக் குறைவாயிருக்கும். மேலும், ஒவ்வொரு தொகுதியிலும் இடமிருந்து வலமாய்ச் செல்லச் செல்ல அயனியாக்க ஆற்றலின் மதிப்பு உயர்ந்துகொண்டே செல்லும். கார உலோகங்களில் கடைசியாயுள்ள உட்கூட்டில் ஒரேயொரு 's' எலெக்ட்ரான் இருப்பதால் அவற்றின் அயனியாக்க ஆற்றல் மதிப்பு மிகக்குறைவாயிருக்கும். ஆனால், ஹூலியம், நியான், ஆர்கான் போன்ற மந்த வாயுக்களில் உட்கூடுகள் நிரம்பியிருப்பதால் அவற்றிலிருந்து எலெக்ட்ரானை எளிதாய்ப்

பிரித்துவிடமுடியாது. அதனால், இவ்வகை வாயுக்களின் அணுக்களுக்கு அயனியாக்க ஆற்றலின் மதிப்பு மிக அதிக அளவில் இருக்கும்; இவற்றில் ஹீலியம் அணுவிற்கு மிக அதிகமாயும் (25 எலெக்ட்ரான் வோல்ட்) சீனான் அணுவிற்கு குறைவாயும் (13 எலெக்ட்ரான் வோல்ட்) உள்ளது. மின் நடுநிலைமையுள்ள அணுவிலிருந்து ஓர் எலெக்ட்ரானை விடுவித்து விட்டால் அவ் வணுவின் உட்கூடுகளிலுள்ள எலெக்ட்ரான்களிடையே உள்ள எதிர்ப்புவிசை குறைந்து, எலெக்ட்ரான்கள், அணுக்கருவினை நோக்கி மிக்க அளவில் ஈர்க்கப்படும். இதனால், அனைத்து உட்கூடுகளின் அளவுகளும் சுருங்கும். அதனால், எலெக்ட்ரான் ஒன்றை இழந்த அணுவிலிருந்து அடுத்தடுத்துள்ள ஏனைய எலெக்ட்ரான்களை விடுவிக்கத் தேவைப்படும் ஆற்றலின் மதிப்புக் கூடிக்கொண்டே போகும்.

மாதிரிக்கணக்குகள்

1) ஹைட்ரஜன் அணுவின் 2s ஆற்றல் மட்டத்திலுள்ள ஓர் எலெக்ட்ரான் 1s ஆற்றல் மட்டத்தில் விழும்போது வெளியிடப்படும் கதிர்வீச்சின் அதிர்வெண்ணையும் அலை நீளத்தையும் கணக்கிடுக.

ஹைட்ரஜன் அணுவில் 2s எலெக்ட்ரானின் ஆற்றல் $= -5.44 \times 10^{-19}$ ஜூல்கள்

ஹைட்ரஜன் அணுவில் 1s எலெக்ட்ரானின் ஆற்றல் $= -2.18 \times 10^{-18}$ ஜூல்கள்

$$\therefore \Delta E = 2.18 \times 10^{-18} - 0.544 \times 10^{-18}$$

$$= 1.636 \times 10^{-18}$$ ஜூல்கள்

அதிர்வெண் $$\nu = \frac{\Delta E}{h} = \frac{1.636 \times 10^{-18}}{6.626 \times 10^{-34}}$$

$$= 2.47 \times 10^{15}$$ ஹெர்ட்ஸ்

அலைநீளம் $$\lambda = \frac{C}{\nu} = \frac{3 \times 10^{8}}{2.47 \times 10^{15}} = 1.21 \times 10^{-7}$$ மீ

$= 1210$ ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகள் (Angstrom Units).

(2) மின் நடுநிலையுள்ள இரும்பு அணு, ஃபெரஸ் அயனி, ஃபெரிக் அயனி ஆகியவற்றின் எலெக்ட்ரான் நிலை அமைப்பினை எழுதுக.

மின் நடுநிலையுள்ள இரும்பு அணு	Fe	-	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^6 4s^2$
ஃபெரஸ் அயனி	Fe^{2+}	-	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^6$
ஃபெரிக் அயனி	Fe^{3+}		$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^5$

சுருக்கம்

1. பொறியியற்றுறையில் பயன்படும் பொருள்ளை உலோகங்கள், உலோகக்கலவைகள் எனவும், பீங்கான்கள், கண்ணாடிகள் எனவும், கரிமப் பாலிமர்கள் எனவும் மூன்று வகைகளாய்ப் பிரிக்கலாம்.
2. ஒவ்வோர் அணுவிலும் ஓர் உட்கருவும் அதனைச்சுற்றி எலெக்ட்ரான்களும் உள. ஒவ்வோர் எலெக்ட்ரானும் ஒரு குறிப்பிட்ட தொகுப்புள்ள கவள எண்களைச் கொண்ட கவள நிலையில் உள்ளது.
3. தனிம அட்டவணையில் தனிமங்கள் அணு எண்ணின் ஏறு வரிசைப்படி அமைந்துள்ளன. ஒவ்வோர் அணுவிற்கும், அணு எண் மதிப்பு, அதிலுள்ள மொத்த புரோட்டான்கள் அல்லது மொத்த எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கைக்குச் சமம்.
4. ஒவ்வொரு கவள நிலையும் எலெக்ட்ரான்களால் நிரப்பப்படுவதைப் பௌலியின் தவிர்க்கைத் தத்துவமும், ஹண்டு விதியும் முடிவு செய்கின்றன.
5. அணுவின் வெளி உட்கூட்டிலிருந்து ஓர் எலெக்ட்ரானை விடுவிக்கத் தேவையான ஆற்றல், அயனியாக்க ஆற்றல் எனப்படும்.

வினாக்கள்

1. கவள எண் என்றால் என்ன? எலெக்ட்ரான் நிலையை விளக்கப்பயன்படும் பல்வேறு கவள எண்களைக்கூறி அவற்றை நன்கு விளக்குக.
2. தனிம அட்டவணை என்றால் என்ன? அதுபற்றிச் சிறு குறிப்பு வரைந்து, ஆக்ஸிஜன், நியான், கோபால்ட், தாமிரம் ஆகியவற்றின் அணுக்களிலுள்ள எலெக்ட்ரானிய நிலையமைப்பினை விளக்குக.
3. சிறுகுறிப்பு வரைக.

   அ) பௌலியின் தவிர்க்கைத் தத்துவம்
   ஆ) ஹண்டு விதி
   இ) அயனியாக்க ஆற்றல்

மேற்கோள் நூற்பட்டியல்:

1. 'Selection and use of Engineering materials' – J.A. Charles and F.A.A. Crane, Butterworth– Heinemann Ltd, Oxford, Second Edition, 1991.
2. 'Tomorrow's materials' – Ken Easterling, The institute of metals, London, 1989.

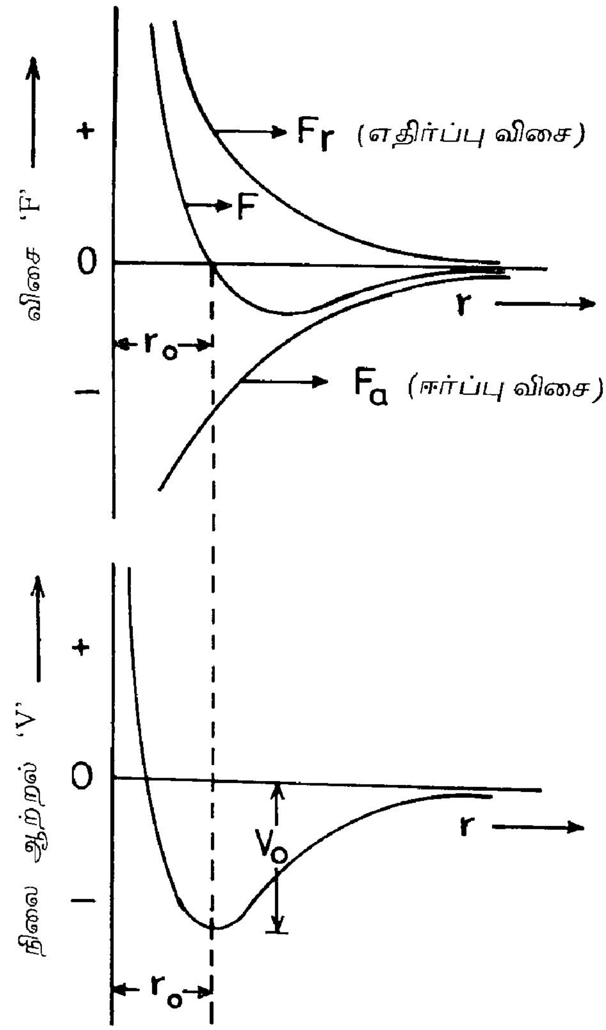
2. அணு இடைப்பிணைப்புகள்

2.1. அறிமுகம்

சென்ற அத்தியாயத்தில் அணு அமைப்பினையும் அணுக்களில் எலெக்ட்ரான்களின் அமைப்பினையும் கண்டோம். பருப்பொருள் (matter) அணுக்களால் உருவானது. அது திண்ம, திரவ, வாயு ஆகிய நிலைகளில் உள்ளது. திண்ம நிலையிள்ள பருப்பொருளின் அடர்த்தி, கடினத்தன்மை, உருகுநிலை ஆகியவை மிக்க மதிப்பினைப் பெற்றிருக்கின்றன. திண்மப்பொருள்களில் அணுக்கள் யாவும் ` ஒன்றனையொன்று ஈர்த்துக் கொண்டிருப்பதால்தான் இவ்விதச் சிறப்பியல்புகள் திண்மப் பொருள்களுக்கு உண்டாகின்றன. திண்ம நிலையில் அணுக்கள் யாவும் நன்கு கட்டுண்டு இருப்பதால், அவற்றினிடையே உள்ள ஈர்ப்புவிசை வலிமையுடன் இருக்கும். இவ்வித அணுஇடை ஈர்ப்பு விசை திரவ நிலையில் குறைந்த வலிமையிலும், வாயு நிலையில் மிகக்குறைந்த வலிமையிலும் காணப்படும். இவ்வத்தியாயத்தில் 'ஈர்ப்புவிசைகள் அணுக்களிடையே எவ்வாறு ஏற்படுகின்றன; எத்தன்மைகளை உடையன?' என்பன பற்றிக் காண்போம்.

2.2. அணு இடைப்பிணைப்புத் தோன்றும் விதம்

அணுக்களிடை ஈர்ப்பு, அணுக்களின் எலெக்ட்ரான் அமைப்புகளால் ஏற்படுகிறது; குறிப்பாய்க் கூறுவதாயின், அணுவின் வெளிக்கூட்டில் இருக்கும் இணைதிற எலெக்ட்ரான்களால் வருகிறது. ஹீலியம், நியான், ஆர்கான் போன்ற மந்த வாயுக்களின் அணுக்கள் இணைதிற எலெக்ட்ரான்கள் அற்றவை. ஏனெனில், இவற்றின் வெளிக்கூடுகள் முழுமையுற்று இருக்கும். அஃதாவது எட்டு எலெக்ட்ரான்கள் கொண்ட (ஹீலியத்திற்கு மட்டிலும் இரண்டு) நிலைத்த அமைப்பினை உடையன. அதனால் இவ்வணுக்கள் ஒன்றனையொன்று ஈர்க்கும் வலிமையை மிகக்குறைவாகப் பெற்றுள்ளன. மற்றைய தனிம அணுக்களின் வெளிக்கூடுகள் முழுமையுறாமல் இருப்பதால் அவை இணைதிற எலெக்ட்ரான்களைப் பெற்றிருக்கின்றன. ஒவ்வோர் அணுவும் நிலைத்த அமைப்பில் இருக்க விழையும். அதனால், இணைதிற எலெக்ட்ரான்களையுடைய அணுக்கள், தம் இணைதிற எலெக்ட்ரான்களை வேறு அணுக்களுக்கு அளிப்பதாலோ, வேறு அணுக்களின் எலெக்ட்ரான்களை ஏற்பதாலோ, வேறு அணுக்களின் எலெக்ட்ரான்களைப் பகிர்ந்து கொள்வதாலோ 'எட்டு எலெக்ட்ரான்கள்' என்னும் நிலைத்த அமைப்பினைப் பெறமுடியும். இவ்வாறு அணுக்கள் எலெக்ட்ரான்களை இழப்பதாலோ, ஏற்பதாலோ, பகிர்வதாலோ அவற்றின் மின் நடுநிலைமை (electrical neutrality) பாதிக்கப்பட்டு அணு இடைப்பிணைப்புகள் (interatomic bonds), ஏற்படுகின்றன. அணுஇடைப் பிணைப்புகளில் முதன்மைப் பிணைப்புகள் (primary bonds), இரண்டாம்நிலைப் பிணைப்புகள் (secondary bonds) என்று இருவகைகள் உள்ளன. முதன்மைப் பிணைப்புகள் வலிமையானவை. அதனால் அப்பிணைப்பினை உடைக்க மிகுதியான ஆற்றல் தேவைப்படுகிறது. இரண்டாம் நிலைப் பிணைப்புகள் வலிமையற்றவை. ஏனெனில், அப்பிணைப்பினை உடைக்க மிகக்குறைந்த ஆற்றலே தேவைப்படுகிறது. இனி, அணுக்களிடையுள்ள விசைகளினால் எவ்வாறு பிணைப்பு உருவாகிறது என்பதனைச் சற்று விரிவாய்ப் பார்ப்போம். பொதுவாய்



படம் 2.1 ஈரணுக்களிடையேயுள்ள அணுஇடை விசைகளும், நிலைஆற்றலும் அணு இடைத்தூரத்தை (r)ச் சார்ந்துள்ளமையை விளக்கும் படம்

இரண்டு அணுக்களுக்கு (அல்லது அயனிகளுக்கு) இடையேயுள்ள விசைகள் படம் 2.1இல் காட்டியுள்ளபடி அணுக்களுக்கிடையேயுள்ள தூரத்தைச் சார்ந்துள்ளன. அணுக்களிடையே ஈர்ப்புவிசைகள் மட்டும் நிலவுமாயின் அணுக்கள் ஒன்றனையொன்று நெருங்கிவந்து ஒட்டிக்கொள்ளும். ஆனால், இவ்வாறு நடைமுறையில் நிகழவில்லை. மேலும், அணுக்களிடையே பெருமளவில் காலியிடம் இருப்பதனை, நாம் அறிந்துள்ளோம். அதனால், அணுக்களிடையே ஈர்ப்புவிசை மட்டுமின்றி எதிர்ப்புவிசைகளும் (repulsive forces) இருக்க வேண்டும். எதிர்ப்புவிசை திண்மப் பொருள்களின் சுருக்கமுறாத்தன்மையினால் வருகிறது. ஈர்ப்பு விசை அணுக்களின் மின்னூட்டங்களினால் ஏற்படும் நிலைமின்புல விசையால் ஏற்படுகிறது. அணுஇடைத்தூரம் மிகுதியாய் இருந்தால்

அணுக்களிடைக் காணும் பெரும்பான்மை விசை ஈர்ப்பு விசையாகும். அஃது எதிர்க்குறியுடையதாகும். அணுக்கள் இடையேயுள்ள தூரம் மிகக்குறைவாயிருந்தால் எதிர்ப்பு விசை முக்கியத்துவம் பெற்ற விசையாய் மாறும். அது நேர்க்குறியுடையது. மேலும், அணு இடைத்தூரம் குறையக்குறைய எதிர்ப்புவிசை மதிப்பும் கூடிக் கொண்டே செல்லும். அணுக்கள் ஈர்ப்பு விசைகளால் நெருங்கிவரும்போது முதலில் அவற்றின் எலெக்ட்ரான்கள் நெருங்கிவரும். இதனால் இடைவினை (interaction) ஏற்பட்டு எலெக்ட்ரான்கள் ஒன்றனையொன்று எதிர்த்துத்தள்ளும். இவ்வெதிர்ப்பு விசையால் அணுக்கள் மிகுதியாய் விலகிப்போனால், இவ்வெதிர்ப்பு விசையின் வலிமை மிகவும் குறைந்துபோகும். அதனால், அணுக்களிடையே எவ்விடத்தில் ஈர்ப்புவிசையும் எதிர்ப்பு விசையும் மதிப்பில் சமமாய் இருக்கின்றனவோ அவ்விடத்தில் அணுக்கள் நிலைத்தன்மைபெறும். அந்நிலையில், அடுத்தடுத்துள்ள இரண்டு அணுக்களுக்கிடையே உள்ள தூரத்தை '**அணு இடைச் சமநிலைத்தூரம்** (interatomic equilibrium distance)' எனக் கூறுவர். படம் 2.1இல் இத்தூரம் 'r_0' என்று குறிக்கப்பட்டுள்ளது. அணுக்கள் அணு இடைச்சமநிலைத்தூரத்தில் இருக்கும்போது அவற்றிற்கு இடையே காணும் விசை சுழியாகவும், மேலும் அவற்றின் **நிலை ஆற்றல்** (potential energy) சிறும மதிப்பிலும் இருக்கும். இச்சிறும நிலைஆற்றலின் மதிப்பே **இணைப்பு ஆற்றல்** (binding energy) எனப்படுகிறது.

இரண்டு அணுக்கள் சேர்ந்து ஒருபிணைப்பினை ஏற்படுத்தும்போது அவ்வணுக்களின் இணைதிற எலெக்ட்ரான்கள் தங்களுக்குள் மாற்றியமைத்துக்கொண்டு குறைவான நிலைஆற்றலுள்ள நிலையான அமைப்பிற்கு வரும். இத்தகைய முறையால் இவ்விரண்டு அணுக்களும் சிறிது ஆற்றலை இழக்கின்றன. ஒரு பிணைப்பின் வலிமை, பிணைப்பு ஏற்படும்போது இழக்கும் ஆற்றலின் மதிப்பினைப் பொறுத்துள்ளது. ஆற்றல் இழப்பு மிகுதிப்படின் பிணைப்பின் வலிமை மிகுதிப்படும். எனவே பிணைப்பு ஆற்றல் என்பது இரண்டு அல்லது அதற்கு மேற்பட்ட அணுக்கள் கூடி ஒரு மூலக்கூறையோ அல்லது ஒரு நிலையான அமைப்பையோ ஏற்படுத்தத் தேவையான ஆற்றலாகும். அப்பிணைப்பாற்றல், திண்மப் பொருள்களில் மிகுதியாயும், திரவ, வாயுப் பொருள்களில் குறைவாயும் உள்ளது. வேதியியல் பிணைப்புகளின் வலிமையைப் பொறுத்து அவைகளை **முதன்மைப் பிணைப்புகள், இரண்டாம்நிலைப் பிணைப்புகள்** என்று பிரித்துள்ளனர். முதன்மைப்பிணைப்புகள் 1 முதல் 5 எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டுகள் வலிவுடையனவாயும், அவற்றில் அணு இடைத்தூரம் 1லிருந்து 2 ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகள் மதிப்புடையனவாயும் இருக்கும். இரண்டாம்நிலைப் பிணைப்புகள் 0.02 முதல் 0.5 எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டுகள் வலிவுடையனவாயும், அவற்றில் அணு இடைத்தூரம் 2லிருந்து 5 ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகள் மதிப்புடையனவாயும் இருக்கும். இரண்டாம் நிலைப் பிணைப்புகள் மூலக்கூறு இருமுனைவுகளுக்கு இடையேயான ஈர்ப்பினால் (intermolecular dipole attraction) உண்டாகின்றன. பொதுவாய்ச் சில பொருள்களே ஒரே வகைப் பிணைப்புகளால் அமைந்துள்ளன; பெரும்பான்மையான பொருள்கள் கலப்புபிணைப்புகளாலாயவை. அதனால், ஒரு பொருளில் எவ்வகைப் பிணைப்புப் பெரும்பங்குவகிக்கின்றதோ அதன்

மூலம் அதனை அயனிப் பொருளாகவோ, உலோகப்பொருளாகவோ, பிறிதொரு பொருளாகவோ வகைப்படுத்தலாம்.

இருவகையான விசைகள் இருத்தலின் முக்கியத்துவத்தை உணர்தற்கும் அவற்றால் அணுக்கள் எச்சமநிலைக்கு வருமென்பதனை அறிதற்கும், A, B, என்னும் இரண்டு அணுக்களால் ஆய ஒரு வேதியியல் சேர்மம் 'AB'யை இங்கு எடுத்துக் கொள்வோம். A அணுவின் அண்மையால் B அணுவினது நிலை ஆற்றலைக் கீழ்க்காணும் சமன்பாட்டால் குறிக்கலாம்.

$$\boxed{V(r) = \frac{-a}{r^n} + \frac{b}{r^m}} \tag{2.1}$$

இங்கே 'r' என்பது இரண்டு அணுக்களுக்களிடையே உள்ள தூரம். மேலும் a, b, n, m ஆகியவை மூலக்கூறு ABயின் மாறிலிகள். இச்சமன்பாட்டின்படி இரண்டு அணுக்களும் வரையிலி (infinity) தொலைவில் பிரிந்து இருக்கும்போது நிலையாற்றலின் மதிப்பு சுழி ஆகும். சமன்பாடு (2.1)இல் வலப்பக்கத்திலுள்ள முதலுறுப்பு, எதிர்க்குறியுடையது. இஃது ஈர்ப்புவிசையால் தோன்றும் ஆற்றலைக் குறிக்கிறது. இரண்டாம் உறுப்பு நேர்க்குறியுடையது.இஃது எதிர்ப்புவிசையால் ஏற்படும் ஆற்றலைக் குறிக்கிறது. அதனால், இவ்விரு அணுக்களிடையே உள்ள விசை,

$$F(r) = \frac{-dV}{dr} = \frac{-na}{r^{n+1}} + \frac{mb}{r^{m+1}} \tag{2.2}$$

படம் 2.1 இல் $r = r_o$ என்னும் அணு இடைத்தூரத்தில் நிலை ஆற்றல், 'V_o' சிறுமமாகவும், எதிர்க்குறியுடையதாகவும் உள்ளது. இச்சிறும நிலைஆற்றலே **பிணைப்பு ஆற்றல்** (bonding energy) ஆகும். இதனை வேறுவிதமாகவும் கூறலாம். AB என்னும் மூலக்கூறிலிருந்து இரண்டு அணுக்களையும் தனித்தனியே பிரிப்பதற்குத் தேவையான மிகக்குறைந்த ஆற்றல், **பிரிகை ஆற்றல்** (dissociation energy) 'D' எனப்படும். அதனால், $D = V_o$ என்பது தெளிவு. இணைப்பாற்றல் மதிப்பினைப் பின்வருமாறு கண்டறியலாம்.

$$F(r_0) = \left(\frac{-dV}{dr}\right)_{r=r_0} = \left(\frac{-na}{r^{n+1}} + \frac{mb}{r^{m+1}}\right)_{r=r_o} = 0$$

$$\therefore r_o^m = \frac{mb}{na} r_o^n \tag{2.3}$$

$$V(r_o) = V_o = \frac{-a}{r_o^n} + \frac{b}{r_o^m} \tag{2.4}$$

சமன்பாடு (2.3) ஐப் பயன்படுத்த

$$V_o = \frac{-a}{r_o^n} + \frac{bna}{mb\, r_o^n} \text{ (அல்லது)}$$

$$V_o = \frac{-a}{r_o^n}\left(1 - \frac{n}{m}\right) \tag{2.5}$$

ஆனால், சமநிலையில் $F(r_0) = \left(\frac{-dV}{dr}\right)_{r = r_0} = 0$

அஃதாவது, சமநிலையில் மொத்தவிசை சுழியாகும். ஆனால் $n \neq m$ என இருப்பதால் சமநிலையில் நிலை ஆற்றல் சுழியன்று என்பதனைச் சமன்பாடு (2.5) சுட்டிக்காட்டுகிறது. அவ்வாறன்றிச் சமநிலையில் நிலை ஆற்றல் சுழியாயிருந்தால், அஃதாவது ஈர்ப்பு ஆற்றலும், எதிர்ப்பு ஆற்றலும் சமமாயிருந்தால் இரண்டு அணுக்களும் கட்டுண்டிருக்க முடியாது. மேலும் $m >> n$ என இருக்கும்போது, எதிர்ப்பு ஆற்றலின் பங்கு மிகமிகக்குறைய, நிலை ஆற்றல் அல்லது இணைப்பாற்றல், ஈர்ப்பு ஆற்றலாலேயே வரையறுக்கப்படும்.

நிலை ஆற்றல் ஒரு சிறும மதிப்பினை உடையதாயிருக்க வேண்டுமெனில், அஃதாவது, இரண்டு அணுக்கள் கட்டுண்ட நிலையில் இருக்க வேண்டுமெனில், $m > n$ என இருக்க வேண்டும். இதனைக்கீழ்க்காணுமாறு நிரூபிக்கலாம்.

நிலை ஆற்றல் சிறுமமாயிருக்க, $\left(\frac{dV}{dr}\right)_{r = r_o} = 0$ என இருப்பதோடன்றி,

$\left(\frac{d^2 V}{dr^2}\right)_{r = r_o} > 0$ ஆகவும் இருக்க வேண்டும்.

எனவே $\left(\frac{d^2V}{dr^2}\right)_{r = r_o} = \left[\frac{-n(n+1)a}{r^{n+2}} + \frac{m(m+1)b}{r^{m+2}}\right]_{r = r_o} > 0$

சமன்பாடு (2.3) ஐப் பயன்படுத்த, $\frac{-n(n+1)a}{r_o^{n+2}} + \frac{m(m+1)b\, n\, a}{r_o^2 \quad m\, b\, r_o^n} > 0$

அஃதாவது, $\frac{m(m+1)a}{r_0^{n+2}} \cdot \frac{n}{m} > \frac{n(n+1)a}{r_o^{n+2}}$ (அல்லது) $(m+1) > (n+1)$

$$\therefore m > n$$

எனவே அணுக்களிடை வேதியியல் பிணைப்பு ஒன்று உருவாக வேண்டுமெனில், $m > n$ என இருக்க வேண்டும். அஃதாவது, எதிர்ப்பு விசைகள் ஈர்ப்பு விசைகளைக்காட்டிலும் குறுகிய நெடுக்கத்தில் (short range) செயல்பட வேண்டும்.

திண்மங்களில் நிலவும் பிணைப்புகளைப் பின்வருமாறு பிரிக்கலாம்:

(அ) முதன்மைப்பிணைப்புகள் (Primary bonds)

1. ***அயனிப் பிணைப்பு*** (ionic bond): இவ்வகைப் பிணைப்பு சோடியம் குளோரைடு, பொட்டாசியம் குளோரைடு போன்ற உப்புகளில் உள்ளது. இப்பிணைப்பைப் 'பலபடித்தாய முனைவுப் பிணைப்பு (heteropolar bond)' என்றும் கூறுவர்.
2. ***சகபிணைப்பு*** (covalent bond): இவ்வகைப் பிணைப்பு பெரும்பாலும் ஜெர்மேனியம், சிலிக்கான் போன்ற குறைகடத்திகளிலும், வைரம் போன்ற மின் கடத்தாப் பொருள்களிலும் உள்ளது. இப்பிணைப்பை 'ஒரு படித்தாய முனைவுப்பிணைப்பு (homopolar bond)' என்றும் கூறுவர்.
3. ***உலோகப்பிணைப்பு*** (metallic bond): இவ்வகைப் பிணைப்பு தாமிரம், வெள்ளி, மக்னீசியம் போன்ற உலோகங்களில் உள்ளது.

(ஆ) இரண்டாம்நிலைப் பிணைப்புகள் (Secondary bonds)

1. ***மூலக்கூறுபிணைப்பு*** (molecular bond): இவ்வகைப் பிணைப்பு ஹீலியம், நியான் போன்ற மந்த வாயுக்களில் உள்ளது. இப்பிணைப்பை 'வான்டர் வால்ஸ் பிணைப்பு (Vander Waals bond)' என்றும் கூறுவர்.
2. ***ஹைடிரஜன் பிணைப்பு*** (hydrogen bond): இவ்வகைப் பிணைப்பு பனிக்கட்டி (H_2O)யில் உள்ளது.

முதன்மைப் பிணைப்புகளில் சக பிணைப்பும் அயனிப்பிணைப்பும், உலோகப் பிணைப்பினைவிட வலிவானவை. இரண்டாம்நிலைப் பிணைப்புகளில் ஹைடிரஜன் பிணைப்பு, மூலக்கூறு பிணைப்பைவிட வலிவானது.

இனி இவ்வகைப் பிணைப்புகள் ஒவ்வொன்றனையும் தனித்தனியே விரிவாய்க் காண்போம்.

2.3. அயனிப் பிணைப்பு

இரண்டு அணுக்களிடையே, ஓர் அணுவிலிருந்து இன்னோர் அணுவிற்கு இணைதிற எலெக்ட்ரான்கள் அளிக்கப்படுவதால் ஏற்படும் பிணைப்பு 'அயனிப்பிணைப்பு' எனப்படும். இதனை மின்இணைதிறப்பிணைப்பு (electrovalent bond) என்றும் கூறுவர். அயனிப்பிணைப்பு ஏற்படும்போது இரு அணுக்களும் அயனிகளாய் மாறுகின்றன. எலெக்ட்ரானை இழந்த அயனி நேர்மின் அயனியாகவும், எலெக்ட்ரானை ஏற்றுக்கொண்ட அயனி எதிர்மின் அயனியாகவும் இருப்பதால் அவற்றிற்கு இடையே ஈர்ப்புத்தன்மையுள்ள நிலைமின் கூலம் விசை தோன்றுகிறது. இவ்விரு அயனிகளும் மிக நெருக்கமாய் இருக்கும்போது ஈர்ப்பு விசையின் மதிப்பு மிகுதியாகிறது. நேர்மின் அயனிக்கும், எதிர் மின் அயனிக்கும் இடையே உள்ள ஈர்ப்பு விசை, ஒரே மின்னூட்டம் பெற்ற அயனிகளுக்கிடையே உள்ள எதிர்ப்பு விசையை விட மிகுதியாகும் போது

அயனிப்பிணைப்பு ஏற்படுகிறது. எனவே அயனிப் பிணைப்பு நிலைமின் ஈர்ப்பு விசையால் வருகிறது.

உதாரணமாய்ச் சோடியம் குளோரைடு என்னும் அயனிச் சேர்மத்தை எடுத்துக் கொள்வோம். அதில் சோடியம், குளோரின் என்னும் இரு அணுக்கள் உள்ளன. அவற்றிலுள்ள எலெக்ட்ரானிய நிலை அமைப்பு பின்வருமாறு:

சோடியம் (Z = 11) : $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$

குளோரின் (Z = 17) : $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5$

இதனால் சோடியம் தன்னிடமுள்ள $3s^1$ எலெக்ட்ரானை எளிதாய் வெளியேற்றி விடமுடியும். அதேசமயம் குளோரின் தனது $3p$ நிலை முழுமையுறுதற்காக ஓர் எலெக்ட்ரானை ஏற்றுக்கொள்ள முடியும். வெளிக்கூட்டிலிருந்து ஓர் எலெக்ட்ரானை வெளியேற்றுதற்குத் தேவைப்படும் ஆற்றலை '**அயனியாக்க ஆற்றல்** (ionization energy)' என்பர். அதன்படி, சோடியத்திற்கு அதன் மதிப்பு 5.1 எலெக்ட்ரான்வோல்ட் / அணு ஆகும். அதே சமயம் எலெக்ட்ரானைக் கவரும் (affinity) ஆற்றல் குளோரினுக்கு 3.8 எலெக்ட்ரான் வோல்ட்/அணு ஆகும். அதனால் மிகுதியாய் ஓர் எலெக்ட்ரானை குளோரினுடன் சேர்க்கும்போது அங்கு நிலை ஆற்றல் மதிப்பு குறிப்பிடும்படியாய்க் குறைகிறது. அதனைப் பின்வருமாறு காணலாம்.

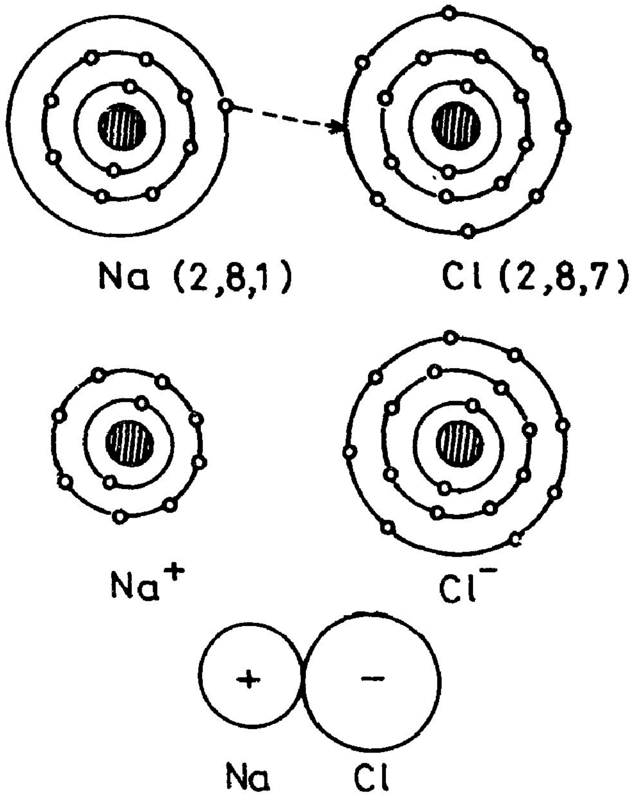
பிணைப்பு ஏற்படும்போது ஆற்றல் மிகும் இடங்கள்

1. சோடியம் அணுவிலிருந்து எலெக்ட்ரான் விடுபடும்போது
2. குளோரின் மூலக்கூறுவிலிருந்து குளோரின் அணுக்களைப் பிரிக்கும்போது.
3. திண்மநிலைசோடியத்திலிருந்து சோடியம் அணுக்களைப் பிரிக்கும்போது.

பிணைப்பு ஏற்படும்போது ஆற்றல் இழப்பு ஏற்படும் இடங்கள்

1. குளோரின் அணுவின் M கூடு நிறைவுறும்போது
2. சோடியம் குளோரைடின் அணிக்கோவை உருவாகும்போது. (**அணிக்கோவை ஆற்றல்** (lattice energy) என்பது இரு எதிரெதிர் மின்னேற்றங்களை உடைய அயனிகளுக்கு இடையே உள்ள நிலை மின் ஈர்ப்பு விசையாகும். அதனால் சோடியம் குளோரைடு அணிக்கோவை, சிறிது ஆற்றலை இழந்து உருவாகிறது).

அணிக்கோவை ஆற்றலிழப்பு மிகுதியாயிருப்பதால் சோடியம் குளோரைடு உருவாகும்போது ஏற்படும் ஆற்றலிழப்பு, அதிகரித்த ஆற்றலைவிட மிகுதியாயுள்ளது. இங்ஙனம் சோடியம் குளோரைடு உருவாகும்போது இழந்த ஆற்றல் வெப்பமாகவோ ஒளியாகவோ வெளியாகும். படம் 2.2 இல் எலெக்ட்ரான் மாற்றல் மூலம் சோடியம் குளோரைடில் அயனிப் பிணைப்பு எங்ஙனம் உருவாகின்றது என்பதைக் காணலாம்.



படம் 2.2 சோடியம் குளோரைடில் அயனிப் பிணைப்பு உருவாகும் விதம்

சோடியம் குளோரைடு மூலக்கூறு உருவாகும்போது ஏற்படும் வேதியியல் மாற்றத்தைப் பின்வரும் சமன்பாட்டால் கூறலாம்.

$$2Na + Cl_2 \longrightarrow 2Na^+ + 2Cl^- \rightarrow 2NaCl$$

மக்னீசியம் குளோரைடைப் பிறிதொரு சான்றாய் எடுத்துக் கொள்ளலாம். இதில் மக்னீசியம் அணுத் தன்னிடமிருந்து இரு இணை திற எலெக்ரான்களை விடுவித்துக் கொள்கிறது. அதேசமயம் இருகுளோரின் அணுக்கள் ஒவ்வொன்றும் ஒவ்வோர் எலெக்ட்ரான் வீதம் அவ்விரு எலெக்ட்ரான்களை ஏற்றுக்கொள்கிறது. எனவே மக்னீசிய அயனிக்கும் குளோரின் அயனிகளுக்கும் இடையே அயனிப் பிணைப்பு உருவாகி மக்னீசியம் குளோரைடு மூலக்கூறு உருவாகிறது. இதைப் பின்வரும் சமன்பாட்டால் கூறலாம்.

$$Mg + Cl_2 \longrightarrow Mg^{++} + 2Cl^{--} \rightarrow MgCl_2$$

அயனிப் படிகங்களுக்குச் சில உதாரணங்கள்

சோடியம் குளோரைடு, மக்னீசியம் ஆக்ஸைடு, மக்னீசியம் குளோரைடு, சோடியம் ஹைடிராக்ஸைடு, மற்றும் அலுமினிய ஆக்ஸைடு (Al_2O_3).

அயனிப்படிகங்களின் பண்புகள்

1. அயனிப்பிணைப்புகள் திசைத்தன்மையில்லாதவை. அதனால், ஓர் அயனிப் படிகத்தில் ஓர் எதிர் மின் அயனியைச் சுற்றிப் பல நேர்மின் அயனிகளும் அல்லது ஒரு நேர்மின் அயனியைச் சுற்றிப் பல எதிர்மின் அயனிகளும் சீராக அமைந்திருக்கும்.

2. திண்மநிலை அயனிப்பொருள்கள் மிகுந்த உருகுநிலையையும், மிகுந்த கொதிநிலையையும் கொண்டுள்ளன. ஏனெனில் அயனிகளிடையே உள்ள நிலைமின் விசையால் ஏற்படும் பிணைப்பு ஆற்றலை விஞ்சுதற்கு அதிக அளவு வெளி ஆற்றல் தேவைப்படுகிறது. பொதுவாய் ஒற்றை இணைதிற அயனிகளாலாய அயனிப்படிகங்களைவிட இரண்டு அல்லது அதற்கு மேலுள்ள இணைதிற அயனிகளாலாய அயனிப்படிகங்களில் பிணைப்புகள் மிக வலிமையாய் இருப்பதால் மிகுந்த இணைதிறனுள்ள அயனிகளாலாய படிகங்கள் உயர் உருகுநிலையைக் கொண்டுள்ளன. உதாரணமாய் மக்னீசியம் ஆக்ஸைடு (Mg O), 2000°Cக்கு மேற்பட்ட உருகுநிலையுடையதாய் விளங்குகிறது. அதனால் அது வெப்பந் தாங்கியாய் எஃகு உற்பத்தி செய்யப்படும் தொழிற்கூடங்களில் பயன்படுகிறது. மேலும், மிகுந்த உருகுநிலையுடைய அலுமினிய ஆக்ஸைடு, உருகிய உலோகங்களைத் தாங்கும் புடக்குவளைகளாய் (crucibles)ப் பயன்படுகிறது.

3. எல்லா அயனிச்சேர்மங்களும் படிக இயலமைப்பை உடையனவாகும். எக்ஸ்ரே விளிம்பு விளைவு(X-ray diffraction)ச் சோதனைகளின் மூலம் இவ்வகைப் படிகங்களில் உள்ள மூலக்கூறுகள் அணுக்களாயில்லாமல் மின்னேற்றம் பெற்ற அயனிகளாயுள்ளன எனத் தெரியவந்தது.

4. சுத்தமான, உலர்ந்த திண்மநிலை அயனிப்பொருள்கள், நல்ல மின்கடத்தாப் பொருள்களாகும். ஏனெனில், அயனிப்பிணைப்பு உருவாகும்போது பங்கேற்ற எலெக்ட்ரான்கள் அயனிகளுடன் நன்கு கட்டுண்ட நிலையில் இருக்கின்றன. எனினும், இவ்வகைப் பொருள்களை வெப்பப்படுத்தும்போதும், நீர் போன்ற கரைப்பான்களில் கரைக்கும்போதும் இவற்றின் மின்கடத்துந்திறன் கூடுகிறது. இந்நிலைகளில் மின்கடத்தலுக்குக் காரணமாய் அமைவன அயனிகளே.

   அ) உயர்ந்த வெப்பநிலைகளில் அயனிகளுக்கிடையே உள்ள நிலைமின் விசையின் வலிமை குறைகிறது. அதனால், சில அயனிகள் கட்டற்ற அயனிகளாய் மாறுவதால் பொருளில் இயங்கு மின்னூட்ட அடர்த்தி மிகுதியாகிறது, அதனால் மின்கடத்துந்திறன் கூடுகிறது.

   ஆ) அதேபோல் அயனிப்படிகத்தை நீரில் கரைக்கும்போது, நீரின் மின் இரு முனைவுகள் (electrical dipoles) அயனிகளுக்கிடையே உள்ள நிலைமின் விசையை வலிமையற்றதாய் மாற்றுகின்றன. இதன் விளைவாய் அயனிகள் கட்டற்ற நிலைக்கு மாறி, கரைசலில் இங்குமங்குமாய் அலையும். இப்போது ஒரு மின்னழுத்த வேறுபாட்டைக் கரைசலில் ஏற்படுத்தினால்

இவ்விதக்கட்டற்ற அயனிகள் இயங்கு மின்னூட்டங்களாய் மாறி மின் கடத்தும். இதனையே மின்பகுப்பு (electrolysis) என்கிறோம்.

5. அயனிச்சேர்மங்கள் நீர்போன்ற முனைவுக் கரைப்பான்களில் (polar solvents) மட்டும் கரையும். முனைவுக்கரைப்பான்கள் அயனிகளோடு மிகுதியாக இடைவினை புரிந்து அவற்றிற்கு இடையே உள்ள ஈர்ப்புவிசையைக் குறைக்கும். உதாரணமாய் நீரின் மின்கடத்தாப் பொருள் மாறிலி(dielectric constant)யின் மதிப்பு 81 ஆகும். அதனால், அயனிகளுக்கு இடையேயுள்ள நிலைமின் ஈர்ப்புவிசையை அதன் தொடக்க மதிப்பின் $\frac{1}{81}$ என்ற அளவாய் மாற்றும். மேலும், அயனிச்சேர்மங்கள் பென்சீன் (C_6H_6), கார்பன் டெட்ராகுளோரைடு (CCl_4) போன்ற முனைவில்லாக் கரைப்பான்களில் (nonpolar solvents) கரையா. ஏனெனில், அவற்றின் மின்கடத்தாப்பொருள் மாறிலியின் மதிப்பு மிகக் குறைவாயுள்ளது.

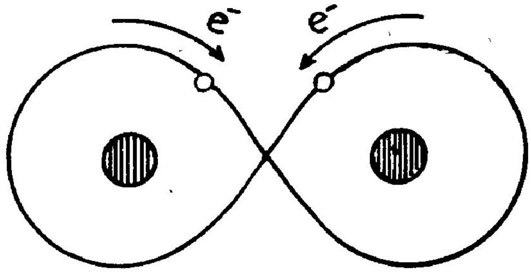
6. தனிமங்களிடையே ஏற்படும் அயனிப் பிணைப்பை பொறுத்தமட்டில் இரு தனிமங்களும் தனிம அட்டவணையில் (periodic table) வலப்பக்கம் ஒன்றும் இடப்பக்கம் ஒன்றும் என இருக்குமாயின் அயனிப்பிணைப்பு எளிதாய் ஏற்படும். ஆனால், தனிம அட்டவணையில் அடுத்தடுத்துள்ள தனிமங்களிடையே ஏற்படும் பிணைப்புகளோ, ஒரு தனிமத்தின் மூலக்கூறுகளோ, அல்லது படிகம் உருவாதற்குரிய பிணைப்புகளோ அயனிப் பிணைப்புகளாயிருக்க முடியாது. அத்தகைய நிலைகளில் சக பிணைப்பே செயல்படுகிறது.

2.4. சகபிணைப்பு

ஒவ்வொரு சக பிணைப்பிலும் எலெக்ட்ரான்களை இரு அணுக்கள் அல்லது அதற்கு மேற்பட்ட அணுக்கள் பகிர்ந்து (sharing) கொள்கின்றன. எலெக்ட்ரான் பகிர்வு நடக்கும்போது அணுக்களிடையே உள்ள நிலைஆற்றல் குறைந்தால்தான் இத்தகைய சகபிணைப்பு ஏற்படமுடியும். சான்றாய் முழுமையுற்ற கவள நிலையிலுள்ள ஹீலியம் அணு ஒன்று, அதன் 1s எலெக்ட்ரான்களை மற்றொரு ஹீலியம் அணுவின் 1s எலெக்ட்ரான்களோடு பகிர்வதால், இவ்வமைப்பின் நிலை ஆற்றலில் குறைவு ஏதும் ஏற்படாததால் அங்கே சகபிணைப்பு உருவாகாது. இதனால் ஹீலியம் வாயுவில் ஹீலியம் ஓரணு நிலையிலேதான் உள்ளது. அடுத்ததாய், முழுமையுறா கவள நிலையிலுள்ள ஹைடிரஜன், குளோரின் அணுக்களை எடுத்துக்கொள்வோம். அவையிரண்டும் அவற்றின் எலெக்ட்ரான்களை அவைகளுக்குள் பகிர்ந்துகொண்டு ஹைடிரஜன் குளோரைடு என்னும் மூலக்கூறாய் உருவாக முடியும். இங்ஙனம் ஹைடிரஜனும், குளோரினும் சேர்ந்து ஹைடிரஜன் குளோரைடாய் மாறும்போது அவ்வமைப்பின் நிலை ஆற்றல் மதிப்புச் சிறிது குறைகிறது.

இத்தகு சகபிணைப்புகள் இருவகைகளில் உருவாகலாம். (1) பிணைக்கப்பெறும் இரு அணுக்களும் ஒவ்வோர் எலெக்ட்ரானை அளிக்கலாம். (2) பிணைப்பிற்குத் தேவையான

இரு எலெக்ட்ரான்களையும் ஒரேயோர் அணுமட்டிலுமே அளிக்கலாம். முதல்வகை சகபிணைப்பினை **இயல்பாய சகபிணைப்பு** (normal covalent bond) என்றும், இரண்டாம் வகை சகபிணைப்பினை **ஈதல் சகபிணைப்பு** (coordinate covalent bond) என்றும் கூறுவர். இயல்பாய சகபிணைப்பினை விளக்குவதற்கு ஹைடிரஜன் மூலக்கூறைச் சான்றாய் எடுத்துக்கொள்வோம்.



படம் 2.3 ஹைடிரஜன் மூலக்கூறிலுள்ள சக பிணைப்பு

ஹைடிரஜன் அணுவில் ஒரேயோர் எலெக்ட்ரான்தான் உள்ளது. ஆனால், அதன் வெளிக்கூட்டை நிரப்புதற்கும் அதன்மூலம் ஒரு நிலைத்த அமைப்பினை உண்டாக்குதற்கும் அவ்வெளிக்கூட்டில் இரு எலெக்ட்ரான்கள் இருக்க வேண்டும். இரு ஹைடிரஜன் அணுக்கள் சேர்ந்து, ஒரு மூலக்கூறாய் உருவாகும்போது பகிர்ந்து கொள்ளப்பட்ட எலெக்ட்ரான்கள் ஹைடிரஜன் அணுக்களை படம் 2.3யில் காட்டியவாறு சுற்றிக்கொண்டிருக்கும். இங்ஙனம் சுற்றும்போது அவை அணுக்கருக்களிடையே அதிக நேரத்தைச் செலவழிக்கும். ஏனெனில், மூலக்கூறு உருவாகும்போது இரு அணுக்கருக்களை இணைக்கும் அச்சிலுள்ள புள்ளிகளில் எலெக்ட்ரான் பகிர்வின் அடர்த்தி கூடுகிறது. அதனால், நேர்மின்னூட்டம் பெற்ற அணுக்கருக்களுக்கு இடையே ஒரு செயலுறு எதிர்மின்னூட்டம் (effective negative charge) ஏற்படுகிறது. இச்செயலுறு எதிர்மின்னூட்டம் அணுக்கருக்கள்மீது ஓர் ஈர்ப்புவிசையை ஏற்படுத்துகிறது. இவ்வீர்ப்பு விசை அணுக்கருக்களுக்கு இடையே நிலவும் எதிர்ப்புவிசையை விட மிகுதியாய் இருக்கும். ஆனால், அணுக்கருக்கள் மிக அண்மையில் இருக்கும் போது எதிர்ப்புவிசையின் மதிப்பு மிக அதிகமாய் இருக்கும். இதனால், மூலக்கூறும் சமநிலையில்லாமல் இருக்கும்.

அணுக்கருக்களுக்கு இடையே உள்ள தூரம் 0.74 ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகள் இருக்கும்போது ஈர்ப்புவிசைக்கும் எதிர்ப்புவிசைக்கும் இடையே சமநிலை ஏற்பட்டு சகபிணைப்பு ஏற்படும். அதனால், சகபிணைப்பிலுள்ள மூலக்கூறை அதன் அணுக்களாய் பிரிக்க நாம் சிறிது ஆற்றலைச் செலவழிக்க வேண்டும். இந்த ஆற்றலின் மதிப்பு சுமார் 4.5 எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டுகளாகும். அஃதாவது,

$$H_2 + 4.5 \text{ எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டுகள்} \rightarrow H + H$$

'ஒரு தனிமம் எத்தனை சகபிணைப்புகளைப் பெற்றிருக்க முடியும்?' என்பது, அதன் வெளிக்கூட்டில் எத்தனை எலெக்ட்ரான்களைச் சேர்க்க முடியும் என்பதனைச் சார்ந்துள்ளது. ஆனால், வெளிக்கூட்டில் எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை எட்டுக்கு

மிகாமல் இருக்க வேண்டும். உதாரணமாய், ஒரு தனிமத்தின் வெளிக்கூட்டில் N இணைதிற எலெக்ட்ரான்கள் உள என வைத்துக்கொள்வோம். அத்தனிமத்தினால் (8 - N) என்ற எண்ணிக்கையை உடைய சகபிணைப்புகளைப் பெற்றிருக்க முடியும். எடுத்துக்காட்டாய், தனிம அட்டவணையின் ஏழாம் தொகுதியிலுள்ள உப்பினிகள் எனப்படும் ஹேலஜன்களுக்கு (halogens), 8 – 7 = 1 சகபிணைப்பு அல்லது ஓர் அண்டை அணு இருக்கும். இதிலிருந்து ஹேலஜன்கள் ஈரணு மூலக்கூறுகளாய் (diatomic molecules) அமையும் என்பது தெரிகிறது. அதேபோல் ஆறாம் தொகுதியிலுள்ள தனிமங்களாய கந்தகம், செலினியம், டெலூரியம் போன்றவை 8 – 6 = 2 சகபிணைப்பு உடையனவாயிருக்கும். அதனால், அணுக்கள் ஒரு நீண்ட சங்கிலி அமைப்பில் அமையும். இச்சங்கிலியில் ஒவ்வொரு அணுவிற்கும் இரு அண்டை அணுக்கள் இருக்கும். இதேபோல் நாலாம் தொகுதியைச் சார்ந்த கார்பன் 8 – 4 = 4 சகபிணைப்புகளைப் பெற்றிருக்கும். சகபிணைப்புகளிலுள்ள அணுக்களிடையே வலுவான ஈர்ப்பு ஆற்றல் இருக்கும். உதாரணமாய், கார்பனின் புறவேற்றுமை அமைப்புகளில் ஒன்றான வைரத்தை எடுத்துக்கொள்வோம். இயற்கைப் பொருள்களிலேயே வைரம் மிகக்கடினத்தன்மை வாய்ந்தது என்பது அனைவரும் அறிந்த ஒன்றாகும். ஒவ்வொரு கார்பன் அணுவும் அதன் புறக்கூட்டில் நான்கு எலெக்ட்ரான்களைப் பெற்றிருக்கிறது; இந் நான்கு எலெக்ட்ரான்களையும் அஃது அடுத்துள்ள நான்கு அணுக்களோடு பகிர்ந்து கொள்கிறது. இதனால், முற்றிலும் சகபிணைப்புகளால் உருவான ஒருமுப்பரிமாண அணிக்கோவையில் வைரம் திகழ்கிறது.

வேதியியலில், சகபிணைப்பு உருவாகும்போது பகிர்ந்துகொள்ளப்படும் எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை சில கிடைமட்டக் கோடுகளால் காட்டப்படும்.

உதாரணமாய் $H - H \longrightarrow H_2$

இதில் ஒற்றைக்கிடைமட்டக்கோடு, ஹைடிரஜன் அணுக்கள் ஒவ்வொன்றும் ஒவ்வொரு எலெக்ட்ரானைப் பகிர்ந்துகொள்கின்றன என்பதனைக்காட்டுகிறது.

இதேபோல்

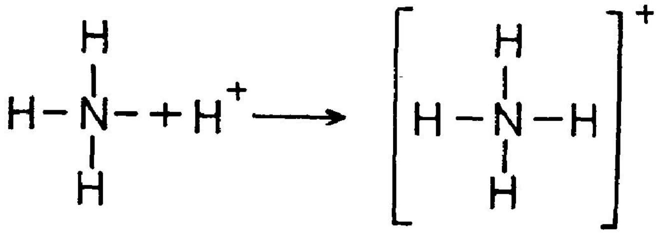
$$O = C = O \longrightarrow CO_2$$

இதில் இரட்டைக்கிடைமட்டக்கோடுகள், ஆக்ஸிஜன் அணுக்கள் ஒவ்வொன்றும் இரு எலெக்ட்ரான்களைக் கார்பன் அணுவுடன் பகிர்ந்துகொள்வதால் கார்பன் டை ஆக்ஸைடு உருவாகிறது என்பதனைக்காட்டுகின்றன. மேலும்

$$N \equiv N \longrightarrow N_2$$

இதில் மூன்று கிடைமட்டக்கோடுகள், நைட்ரஜன் அணு ஒவ்வொன்றும் மூன்று எலெக்ட்ரான்களைப் பகிர்ந்து கொள்வதைக் குறிக்கின்றன. மேலும் இரண்டிற்குமேற்பட்ட எலெக்ட்ரான்கள் பிணைப்பில் பங்கேற்கும்போது அணு இடைத்தூரம் குறைகிறது. அதனால், பிணைப்பு வலுவாகி, அப்பிணைப்பினை உடைய பொருள் கடினமாய் மாறுகிறது.

ஈதல் சகபிணைப்பிற்கு எடுத்துக்காட்டாய் அமோனிய அயனியை (NH_4^+) எடுத்துக்கொள்வோம். அமோனியாவில் உள்ள நைட்ரஜனில் பிணைப்பில் பகிர்ந்து கொள்ளப்படாத இரு எலெக்ட்ரான்கள் உள்ளன. அதனால், அவை வேறோர் அணுவோடு பிணைப்பினை ஏற்படுத்தப் பயன்படுகின்றன. அதனால், நேர்மின் ஹைடிரஜன் அயனியை அமோனியாவுடன் இணைக்கையில் இவ்விரு எலெக்ட்ரான்களும், எலெக்ட்ரான்களற்ற ஹைடிரஜன் அயனியோடு சகபிணைப்பினை உண்டாக்குகின்றன. இவ்வாறாய் NH_4^+ அயனியில் மூன்று இயல்பாய சகபிணைப்புகளும், ஓர் ஈதல் சகபிணைப்பும் ஏற்படுகின்றன.



படம் 2.4 ஈதல் சகபிணைப்பு

சகபிணைப்புடைய சில பொருள்கள்

திண்மப்பொருள்கள்	:	வைரம், சிலிக்கான், ஜெர்மேனியம், துத்தநாக சல்பைடு.
திரவ பொருள்கள்	:	கார்பன்டெட்ராகுளோரைடு, நீர்.
வாயுப்பொருள்கள்	:	ஹைடிரஜன், கார்பன் டை ஆக்ஸைடு, நைட்ரஜன், ஹைடிரஜன் குளோரைடு.
கரிமப்பொருள்கள்	:	மீத்தேன், எத்திலின், ஈத்தேன்.

சகபிணைப்புடைய பொருள்களின் சிறப்பியல்புகள்

(1) சகபிணைப்புடைய பல்வேறு பொருள்களில் இயற்பியற் குணங்கள் மிகுதியாய் மாறுபட்டுள்ளன. ஒவ்வொன்றிலும் ஒவ்வொரு விதமாய் எலெக்ட்ரான் பகிர்வு இருப்பதே இதற்குக் காரணமாகும். சான்றாய், தனிம அட்டவணையின் தொகுதி IVஇல் வைரம் (கார்பன்), சிலிக்கான், ஜெர்மேனியம், வெள்ளீயம் மற்றும் காரீயம் போன்ற தனிமங்கள் உள்ளன. வைரத்தை எடுத்துக்கொண்டோமானால் அது மிக கடினமாயுள்ளது. அதன் உருகுநிலை 3280 கெல்வினாகும். அதே சமயம் சகபிணைப்புடைய வெள்ளீயம் (Tin), மிகவும் மென்மையாகவும் குறைவான உருகுநிலை உடையதாகவும் உள்ளது. அஃதாவது, சிலிக்கானில் இருந்து காரீயம் வரை சென்றால் கடினத்தன்மையும், உருகுநிலையும் குறைந்துகொண்டே செல்கின்றன. மேலும், வைரம் ஒரு நல்ல மின்கடத்தாப்பொருள். ஆனால், சிலிகான், ஜெர்மேனியம் குறை கடத்திகள்; வெள்ளீயம் ஒரு நல்ல கடத்தி.

(2) சகபிணைப்புடைய பொருள்களில் பிணைப்பு நீளமும் (bond length), பிணைப்பு ஆற்றலும் பகிர்வில் பங்கெடுக்கும் எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கையைச் சார்ந்துள்ளன.

அட்டவணை 2.1

சகபிணைப்புடைய பொருள்களின் பிணைப்பு ஆற்றல்கள்

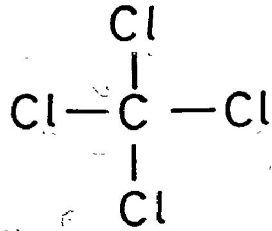
சகபிணைப்புடைய பொருள்கள்	பிணைப்பு நீளம் (ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகள்)	பிணைப்பு ஆற்றல் (கிலோ ஜுல்/மோல்)
H - H	0.74	437.6
Cl - Cl	2.00	243.6
C - C	1.50	349.0
C = C	1.30	613.2
C ≡ C	1.20	817.0
C - O	1.50	352.8
C = O	1.20	751.8

அட்டவணை 2.1 மூலம் பகிர்ந்துகொள்ளப்படும் எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை கூடும்போது அணு இடைத்தூரம் குறைகிறது என்றும், அதேசமயம் பிணைப்பாற்றல் கூடுகிறது என்றும் அறியலாம்.

(3) பிணைப்பு உருவாகும்போது இருமுனைவுத் திருப்புத்திறன் (dipole moment) உண்டாகிறது. உதாரணமாய் சகபிணைப்புடைய ஹைடிரஜன் குளோரைடு மூலக்கூறில் எலெக்ட்ரான் பகிர்வினால் குளோரின் அணுவிற்குச் சிறிது எதிர் மின்னூட்டமும், ஹைடிரஜன் அணுவிற்குச் சிறிது நேர்மின்னூட்டமும் கிடைக்கிறது. இங்ஙனம் கிடைக்கும் மின்னூட்டம் சுமார் 0.272×10^{-19} கூலம் ஆகும். இஃது அடிப்படை மின்னூட்டமாய 1.6×10^{-19} கூலம் என்ற அளவைவிட மிகக்குறைவு. ஹைடிரஜன் அணுவிற்கும், குளோரின் அணுவிற்கும் இடையே உள்ள அணு இடைத்தூரம் 1.27 ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகள். இதனால் கிடைக்கும் இருமுனைவுத் திருப்புத்திறன் சுமார் 0.343×10^{-29} கூலம் மீட்டர் என இருக்கும். இதை டிபை (Debye) அலகுகளிலும் கூறலாம்.

1 டிபை அலகு $= \frac{1}{3} \times 10^{-29}$ கூலம் மீட்டர். அதனால் ஹைடிரஜன் குளோரைடு மூலக்கூறில் உள்ள இருமுனைவுத் திருப்புத்திறன் 1.03டிபை அலகுகள் ஆகும். இங்ஙனம் ஒரு மூலக்கூறில் இருமுனைவுகள், பிணைப்புகள் சமச்சீர் இல்லாமல் இருக்கும் போது மட்டும் ஏற்படுகின்றன. இவற்றை முனைவு பிணைப்புகள் (polar bonds) என்பர். மேலும் மின் இருமுனைவு உள்ள மூலக்கூறுகளை '**முனைவு மூலக்கூறுகள்** (polar molecules)' என்பர். ஒரு மூலக்கூறில் பிணைப்புகள் சமச்சீர் உடையனவாயிருந்தால் பிணைப்புகளில் தோன்றும் இருமுனைவுகளின் தொகுபயன் சுழியாயிருக்கும். அதனால், அந்த மூலக்கூறுகளை '**முனைவில்லா மூலக்கூறுகள்** (non polar molecules)' என்பர். உதாரணமாய் கார்பன் டை ஆக்ஸைடையும், கார்பன் டெட்ராகுளோரைடையும்

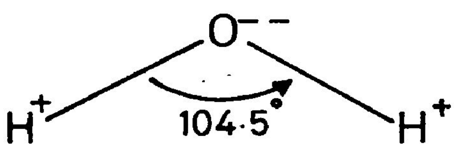


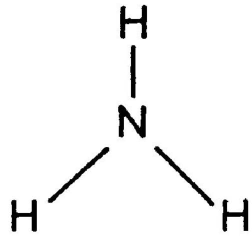


கார்பன் டை ஆக்ஸைடு மூலக்கூறு கார்பன் டெட்ரா குளோரைடு மூலக்கூறு

படம் 2.5 முனைவில்லா மூலக்கூறுகள்

எடுத்துக்கொள்வோம். கார்பன் டை ஆக்ஸைடில் கார்பன் அணுவின் இருபக்கமும் சமச்சீருடன் ஆக்ஸிஜன் அணுக்கள் இருப்பதால் கார்பன் டை ஆக்ஸைடில் இருமுனைவுத் திருப்புதிறன் ஏதும் இராது. அதேபோல் கார்பன் டெட்ரா குளோரைடில் கார்பன் அணுவைச் சுற்றி நான்கு குளோரின் அணுக்கள் சமச்சீராய் அமைந்துள்ளன. அதிலும் இருமுனைவுத்திருப்புதிறன் மதிப்பு சுழியாக இருக்கிறது. ஆனால், சமச்சீரில்லா, மூலக்கூறுகளான நீர் (H_2O), ஹைடிரஜன் குளோரைடு (HCl), அமோனியா (NH_3) ஆகியவற்றில் இருமுனைவுகள் ஏற்பட்டு, அதனால், அவற்றின் இருமுனைவுத் திருப்புதிறன்களின் தொகுபயன் மதிப்புச் சுழியில்லாமல் இருக்கிறது. அதனால், இவற்றை முனைவு மூலக்கூறுகள் என்று அழைக்கிறோம்.





நீர் மூலக்கூறு அமோனியா மூலக்கூறு

படம் 2.6 முனைவு மூலக்கூறுகள்

(4) சகபிணைப்புகள் திசைத்தன்மைகளை உடையனவாயுள்ளன. அதனால், பிணைப்பின் திசையில் ஏதாவது மாற்றம் நிகழ்ந்தால், உடனே வேறொரு பொருளாக உருவெடுக்கிறது.

(5) சகபிணைப்புடைய பொருள்கள், முனைவில்லாக்கரைப்பான்களாய பென்சீன், கார்பன் டை சல்பைடு போன்றவற்றில் கரையும். ஏனெனில் கரைப்பான்களும் சகபிணைப்பினை உடையனவாய் இருப்பதே காரணமாகும். எனினும், மிகப்பெரும் மூலக்கூறுகள் உள்ள சகபிணைப்புடைய பொருள்கள் எக்கரைப்பான்களிலும் கரையா. ஏனெனில் அவற்றின் மூலக்கூறுகளின் அளவு மிகவும் அதிகமாய் இருக்கிறது.

(6) அயனிக்கூட்டுப்பொருள்களோடு ஒப்பிடும்போது சகபிணைப்புடையப் பொருள்களின் உருகுநிலையும் கொதிநிலையும் குறைவாயுள்ளன. ஏனெனில் சகபிணைப்பு அயனிப்பிணைப்பு போல் வலுவுள்ளதாய் இல்லை.

(7) பல்வேறு சகபிணைப்புடைய திண்ம பொருள்கள் நல்ல மின்கடத்தாப் பொருள்களாயுள்ளன. ஏனெனில், இணைதிற எலெக்ட்ரான்கள் நன்கு கட்டுண்ட நிலையில் சகபிணைப்புகளில் உள்ளன. எனினும், குறிப்பிட்ட வேற்றுப்பொருள்களை இவற்றில் சேர்க்கும்போது இவை குறை கடத்திகளாய் மாறுகின்றன.

(8) சகபிணைப்புடைய திண்மப் பொருள்கள் படிக இயலமைப்பினை உடையதாய் உள்ளன. உதாரணங்கள்: வைரம், ஜெர்மேனியம், சிலிக்கான்.

(9) சகபிணைப்புடைய சேர்மங்கள் திண்ம, திரவ, வாயு நிலைகளில் உள்ளன. திண்ம நிலையில் உள்ளவை மிகுதியாய மூலக்கூறு எடை உடையதாயும், கடினமாயும் நொறுங்குந் தன்மை (brittle) உடையதாயும் உள்ளன.

அட்டவணை 2.2இல் அயனிப்பிணைப்பிற்கும், சகபிணைப்பிற்கும் உள்ள வேறுபாடுகள் கொடுக்கப்பட்டுள்ளன.

அட்டவணை 2.2

அயனிப்பிணைப்பிற்கும், சகபிணைப்பிற்கும் உள்ள வேறுபாடுகள்

அயனிப்பிணைப்பு	சகபிணைப்பு
1. அயனிப்பிணைப்பு, ஓர் அணுவிலிருந்து இன்னோர் அணுவிற்கு எலெக்ட்ரான்கள் அளிக்கப்படுவதால் ஏற்படுகிறது.	1. சகபிணைப்பு, இரு அணுக்களிடையே எலெக்ட்ரான்கள் பகிர்ந்துகொள்ளப்படுவதனால் ஏற்படுகிறது.
2. அயனிப்பிணைப்புடை பொருள்கள் திண்மநிலையில் மட்டும் உள்ளன.	2. சகபிணைப்புடை பொருள்கள் திண்ம, திரவ, வாயு நிலைகளிலும் உள்ளன.
3. திசைத்தன்மைகளை உடையன அல்ல	3. திசைத்தன்மைகளை உடையன.
4. முனைவுகரைப்பான்களில் மட்டும் கரையும்.	4. முனைவில்லாக் கரைப்பான்களில் மட்டும் கரையும்.
5. அதிக உருகுநிலையையும் அதிக கொதி நிலையையும் கொண்டுள்ளன.	5. பொதுவாய் உருகுநிலையும், கொதிநிலையும் குறைவாய் இருந்தாலும் மிகுந்த உருகுநிலை உள்ள பொருள்களும், மிகக் குறைந்த உருகுநிலை உள்ள பொருள்களும் உள்ளன.
6. முனைவுகரைப்பான்களில் கரையும்போது மின் கடத்துந்திறன் கூடுகிறது.	6. வேற்றுப்பொருள்கள் கலக்கும்போது மின்கடத்துந்திறன் கூடுகிறது.

7. கடினமில்லாதவை.	7. திண்மநிலையில் உள்ள பொருள்கள் கடினமானவை.
8. அயனிப்பிணைப்புடைச் சேர்மங்களில்எதிரெதிராய மின்னூட்டங்களையுடைய அயனிகளிடையே வலுவான நிலைமின் ஈர்ப்பும், மீச்சிறுதொலைவுகளில் செயல்படும் எதிர்த்துத்தள்ளும் அரைகுறை மீட்சி விசைகளும் செயல்படுகின்றன. இவ்வீர்ப்பு விசை, எல்லாத்திசைகளிலும் சம அளவில் செயல்படுமாதலால், அயனிகள் வசதிக்கேற்ப எந்த நிலைகளிலும் திண்மத்தில் அமையலாம். அதனால் திண்மத்தின் அயனிகள் நெருக்கப்பொதிவு (close packing) முறையில் அமைகின்றன. அதனால்தான் அயனிப்பிணைப்பு, '**பலபடித்தாய முனைவுப்பிணைப்பு**' எனப்படுகிறது.	8. சக பிணைப்புடைச் சேர்மங்களில், சக பிணைப்புகள் எந்தத்திசையில் வேண்டுமானாலும் உருவாக முடியாது. பிணைப்பினை உருவாக்கும் இரு எலெக்ட்ரான் களின் எலெக்ட்ரான் திரள்கள் மேற்பொருந்தும் போது எத்திசையில் பெருமளவு மேற்பொருந்துகிறதோ அத்திசையிலேயே சகபிணைப்புச் செயல்படுகிறது. பிணைப்பில் ஈடுபடும் இரு எலெக்ட்ரான்களின் திரள்கள் அதிக அளவில் மேற்பொருந்தினால், அத்திசையில் அணுக்களிடையே மின்னூட்ட அடர்த்தி அதிகமாகிப் பிணைப்பு வலிவுடையதாயிருக்கும். அதனால் சக பிணைப்பு, '**ஒரு படித்தாய முனைவுப் பிணைப்பு**' எனப்படுகிறது.

2.5. உலோகப் பிணைப்பு

உலோகப்பிணைப்பு, கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களின் திரள்களுக்கும் அணிக்கோவையில் உள்ள நிலையான நேர்மின் அயனிகளுக்கும் இடையே நிலைமின் ஈர்ப்புவிசை ஏற்படுவதனால் உண்டாகிறது. ஓர் உலோகத்தின் இயலமைப்பினைப் பின்வருமாறு கூறலாம். அணுக்கருவையும் நிறைவுற்ற உட்கூடுகளிலுள்ள எலெக்ட்ரான்களையும் மட்டிலும் கொண்ட அயனிகளின் தொகுப்பு, கட்டற்ற எலெக்ட்ரான் வாயுவினில் அமிழ்ந்துள்ளது. நேர்மின் அயனிகளுக்கும் எலெக்ட்ரான் வாயுவிற்கும் இடையே உள்ள ஈர்ப்பு, உலோகத்திற்கு அதன் இயலமைப்பினையும், ஓரியல்பையும் (coherence) அளிக்கிறது. கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்கள் எப்பொழுதும் இயக்க நிலையில் இருப்பதால் உலோகங்கள் மிகுந்த மின்கடத்துந்திறனையும், மிகுந்த வெப்பங்கடத்துந்திறனையும் பெற்றுள்ளன. உலோகப்பிணைப்பு, முற்றிலும் ஒத்த அணுக்கள் இடையிலோ, வேதியியல் அடிப்படையில் ஒரே மாதிரியான அணுக்கள் (கலப்பு உலோகங்கள்) இடையிலோதான் ஏற்படுகிறது. இணைதிற எலெக்ட்ரான்கள் அணுக்களிலிருந்து விடுபட்டு உலோகங்களின் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களாய் மாறும்போது அவற்றின் நிலை ஆற்றலும் இயக்க ஆற்றலும் குறைகின்றன. இதுவே உலோகப்பிணைப்பு ஏற்பட வழி செய்கிறது.

அணு இடைப்பிணைப்புகள்

உதாரணங்கள்: சோடியம், தாமிரம், இரும்பு, வெள்ளி.

சிறப்பியல்புகள்:

1. உலோகப்பிணைப்பு, அயனிப்பிணைப்பு, சகபிணைப்புகளைவிட வலிமை குறைந்தது. ஆனால், இரண்டாம்நிலை பிணைப்புகளைவிட வலிமை கூடியது.
2. படிக இயலமைப்பினை உடையதாய் இருக்கிறது. மற்றப்பிணைப்புப் படிகங்கள்போல் இல்லாமல் இவற்றைப் பழுது ஏற்படாமல் உருமாற்றம் செய்ய முடியும். ஏனெனில், எலெக்ட்ரான் வாயு உயவு எண்ணெய் அல்லது உராய்வு நீக்கு எண்ணெயாய்ப் பயன்படுவதால் அணுக்கள் ஒன்றன்மேல் ஒன்று விரைவாய்ச் சரிய முடிகிறது.
3. உலோகங்களில் நிலையான நேர்மின் அயனிகளின் சீரான அமைப்பினால் உலோகப் படிகங்கள் உயர்ந்த அளவு படிக சமச்சீரை உடையதாயுள்ளன.
4. உலோகப்பிணைப்புத் திசைத்தன்மையற்றது. ஏனெனில், இவ்வகைப் பிணைப்பு, உலோக அணுக்களின் மொத்த மதிப்பு மிகுதியாய் உள்ள போது மட்டும் ஏற்படுகிறது. குறிப்பாக உலோகப்பிணைப்பில் பங்கெடுக்கும் எலெக்ட்ரான்கள், சகபிணைப்பு எலெக்ட்ரான்கள் போல் செயல்படாமல் வெவ்வேறு நேரங்களில் வெவ்வேறு அணுக்களோடு பகிர்வில் பங்குகொள்கின்றன. எனவேதான் உலோக பிணைப்பைத் தெவிட்டு நிலையடையா சக பிணைப்பு என்றும் கூறுவர்.
5. உலோகப்பிணைப்பு வலுவில்லாமல் இருப்பதால், உலோகங்களின் உருகுநிலையும் கொதிநிலையும், அயனிச் சேர்மங்களினுடையதைவிடக் குறைவாய் உள்ளன.
6. மின்கடத்துந்திறனையும், வெப்பங் கடத்துந்திறனையும் மிகுதியாய்ப் பெற்றுள்ளது. ஏனெனில் இவற்றிலுள்ள கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்கள் கடத்திகளாகப் பயன்படுகின்றன.
7. உலோகங்கள் ஒளிபுகாப் பொருள்களாகும். ஏனெனில், கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்கள் ஒளி ஆற்றலை உட்கவருகின்றன.

2.6. மூலக்கூறு பிணைப்பு அல்லது வான்டெர்வால்ஸ் பிணைப்பு

உயர்வாயுக்களில் (noble gases) கவள நிலைகள் முழுமையுற்ற நிலையில் இருப்பதால் இவ்வகை வாயுக்களின் அணுக்களிடையே முதன்மைப்பிணைப்புகள் எதுவுமே செயல்பட முடியாது. ஏனெனில், முதன்மைப் பிணைப்புகள் யாவற்றிலுமே இணைதிற எலெக்ட்ரான்கள் இன்றியமையாதவை. அதனால், உயர் வாயுக்களின் அணுக்கள் இடையே எவ்வித ஈர்ப்பு விசையும் இருக்க முடியாதெனத் தோன்றுகிறது. சாதாரண வெப்பநிலைகளில் இஃது உண்மையாயிருப்பினும் மிகத்தாழ்ந்த வெப்பநிலைகளில் இந்த வாயுக்கள் திரவமாயும், திண்மமாயும் சுருங்குகின்றன என்னும் உண்மையை எண்ணும்போது இவற்றின் அணுக்களிடையேயும் ஈர்ப்பு விசைகள் இருக்க வேண்டும் என்னும் முடிவிற்கு வரவேண்டியிருக்கும். மேலும் இவ்வீர்ப்பு விசைகள் வலிமை

குறைந்தவையாய் இருத்தல் வேண்டும். அதேபோல் ஹைடிரஜன், ஆக்ஸிஜன், அமோனியா, மீத்தேன் ஆகியவற்றின் மூலக்கூறுகளில் சகபிணைப்புகளால் அவற்றின் இணைதிறக் கூடுகள் நிரம்பியுள்ளன. அதனால், மூலக்கூறில் உள்ள அணுக்கள் வலுவாகப் பிணைக்கப்பட்டிருக்கின்றனவேயன்றி மூலக்கூறுகளிடையே விசைகள் இல்லையென்று சொல்லுமளவிற்கு உள்ளன. எனினும், அம்மூலக்கூறுகளும் தாழ்ந்த வெப்ப நிலைகளில் திரவங்களாயும், திண்மங்களாயும், சுருங்குகின்றன.

மேற்கண்ட உதாரணங்கள் வலுக்குறைந்த இரண்டாம்நிலைப் பிணைப்புகள் நிலவுதலை நிலை நாட்டுகின்றன. தாழ் வெப்ப நிலைகளில் வெப்ப ஆற்றல் குறைவதால் வலிமை குறைந்த இந்த இரண்டாம்நிலைப் பிணைப்புகளால் அவை சுருங்குகின்றன. வான்டெர் வால்ஸ்பிணைப்புப் பெரும்பாலும் மின் இருமுனைவுகளாலேயே தோன்றுகிறது. சமச்சீரற்ற மூலக்கூறுகளில் இருமுனைவுகள் தோன்றும் என்று கண்டோம். மேலும், சமச்சீருடைய மூலக்கூறுகளிலும், உயர்வாயு அணுக்களிலும் கூட எலெக்ட்ரான்களின் தன்னிச்சையான இயக்கத்தால் மின் இருமுனைவுகள் தோன்றுகின்றன. இந்நிலைகளில் ஓர் இடத்தில் மட்டும் எலெக்ட்ரான் அடர்த்தி மிகுந்து காணப்படும். இதனால், நேர்மின்னூட்ட மையத்தோடு எதிர்மின்னூட்ட மையம் சரியாய் மேற்பொருந்தாது போய்விடும். இதனால், மூலக்கூறில் ஓர் இருமுனைவு ஏற்பட்டு அணுக்களிடை ஈர்ப்புவிசைகள் செயல்படும். இவ்விசைகளினாலேயே உயர்வாயுக்களும், சில மூலக்கூறுகளும் தாழ்வெப்பநிலைகளில் சுருங்கித் திரவ, திண்மநிலைகளுக்குச் செல்கின்றன. அதனால், வான்டெர்வால்ஸ் பிணைப்புகள், அணுக்கருவைச் சுற்றியுள்ள கோளக எதிர் மின்னூட்டப் பகிர்வில் மீச்சிறுபொழுதில் ஏற்படும் ஏற்ற இறக்கத்தால் ஏற்படுகின்றன. எலெக்ட்ரான்களின் மின்னூட்டப் பகிர்வின் சராசரியை நீண்ட நேரக்கணிப்பின்படி பார்த்தால் அது கோளகச்சமச்சீர் உடையதாயிருக்கும். ஆனால், குறிப்பிட்ட ஏதாவதொரு நேரத்தில் எலெக்ட்ரான்களின் பரவல் விளைவால் எலெக்ட்ரான்களின் மின்னூட்ட அடர்த்தி ஓரிடத்தில் கூடியும், பிறிதோரிடத்தில் குறைந்தும் இருக்கும். இங்ஙனமாய் நேரத்திற்கு ஏற்பமாறுபடும் ஒரு மின் இருமுனைவு அணுவினுள் தோன்றுகிறது. இதனால் ஏற்படும் மின்புலம் பக்கத்து அணுவில் ஒரு மின் இருமுனைவு திருப்புத்திறனைத்தூண்டுகிறது; தூண்டிய அணுவும், தூண்டப்பெற்ற அணுவும் ஒன்றனையொன்று ஈர்த்துக்கொள்கின்றன. தூண்டப்பெற்ற அணுவில் உள்ள மின் இருமுனைவு அதற்குப் பக்கத்தில் உள்ள அணுவில் மின் இருமுனைவைத் தோற்றுவிக்கும். இங்ஙனமாய் எல்லா அணுக்களிலும் தூண்டப்பெற்ற மின் இருமுனைவுகள் இருக்கும். தூண்டப்பெற்ற மின் இருமுனைவுகளால் தோன்றும் மின் இருமுனைவு இடைவினை ஆற்றல் இரு அணுக்களிடையே உள்ள தூரத்தின் ஆறுமடிக்கு எதிர் விகிதத்தில் உள்ளது. ஆனால், இரு அணுக்களும் மிகவும் நெருங்கி இருந்தால் அங்கு எதிர்ப்பு விசை அவ்விரு அணுக்களிடையே செயல்படும். வான்டெர்வால்ஸ் பிணைப்பு ஏற்படும்போது உள்ள நிலை ஆற்றலைப் பின்வருமாறு எழுதலாம்:

$$\boxed{V = \frac{-A}{r^6} + \frac{B}{r^{12}}} \qquad (2.6)$$

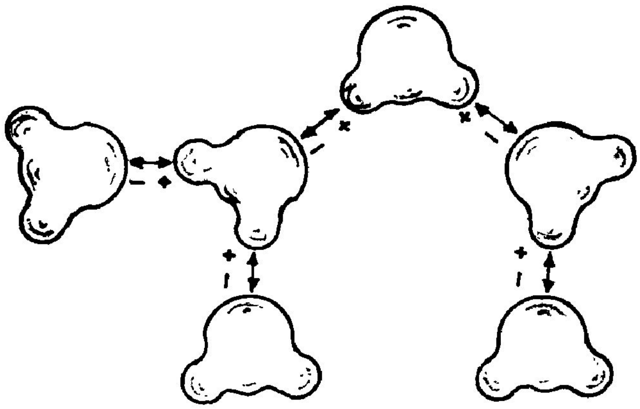
இதில் A, B ஆகியவை மாறிலிகளாகும்; r என்பது அணு இடைத்தூரமாகும். இப்பிணைப்பு ஏன் வலுவற்றதாய் உள்ளது என்பதைப் பின்வருமாறு விளக்கலாம். நேரத்திற்கு ஏற்ப மாறுபடும் மதிப்பைக்கொண்ட தூண்டப்பட்ட அணு மின் இருமுனைவின் மின்புலப் செறிவு மிகக்குறைவாயுள்ளது. மேலும், அது $\frac{1}{r^6}$ என்ற அளவில் மாறுபடுகிறது. வெவ்வேறு அணுக்களில் உள்ள மின் இருமுனைவுகள் ஒன்றோடொன்று இசைவுப் பொருத்தம் (synchronisation) பெறாததால் அவற்றின் ஈர்ப்புத்தன்மைகள் குறைக்கப்படுகின்றன.

சிறப்பியல்புகள்

1. மூலக்கூறு பிணைப்பு உள்ள பொருள்கள் பெரும்பாலும் மந்தவாயுக்களாக உள்ளன. மேலும், அவற்றாலான திண்மபொருள்களுக்கு உருகுநிலை மிகத் தாழ்ந்த வெப்ப நிலையில் உள்ளது. குறிப்பாய்த் திண்ம நிலை நியானின் உருகுநிலை −249°C; அதன் ஆவியாகும் நிலை −246°C; அதன் இணைப்பு நீளமும், இணைப்பாற்றலும் முறையே 3.2 Å, 7.8 கிலோஜூல்/மோல் ஆகும்.
2. மூலக்கூறு பிணைப்புடைச் சேர்மங்கள் படிக உருவிலும், படிக உருவமில்லாமலும் உள்ளன. படிகத்தில் உள்ள மிகச்சிறுபகுதிகள் மூலக்கூறுகளாயுள்ளன. இவ்வகைப் படிகங்கள் குறைந்த அணுஎண் உடைய தனிமங்களால் உருவாகின்றன. மேலும், அவை குறைந்த அடர்த்தி உள்ளனவாயும் உள்ளன.
3. இணைதிற எலெக்ட்ரான்கள் இல்லாததால் இப்பொருள்கள் நல்ல மின்கடத்தாப் பொருள்களாயுள்ளன.
4. மேலும், இணைதிற எலெக்ட்ரான்கள் இல்லாததால் ஒளி ஆற்றல் உட்கவரப்படுவதில்லை. இதனால், இவ்வகைச் சேர்மங்கள் ஒளிபுகும் ஊடகங்களாய் விளங்குகின்றன.
5. இவ்வகைச் சேர்மங்கள் முனைவுக்கரைப்பான், முனைவில்லாக்கரைப்பான் ஆகியவற்றில் கரைகின்றன.

2.7. ஹைடிரஜன் பிணைப்பு

ஹைடிரஜன் பிணைப்பு நீர், அமோனியா போன்ற மூலக்கூறுகளிடையே உள்ள நிலையான மின் இருமுனைவுத் திருப்புத் திறன்களினால் ஏற்படுகிறது. நீர் மூலக்கூற்றின் ஹைடிரஜன் முனையில் உள்ள மொத்த நேர் மின்னூட்டமும், பக்கத்து மூலக்கூற்றின் ஆக்ஸிஜன் முனையில் உள்ள மொத்த எதிர் மின்னூட்டமும் ஒன்றனையொன்று படம் 2.7 இல் காட்டியவாறு ஈர்ப்பதால் ஹைடிரஜன் பிணைப்பு ஏற்படுகிறது. அதனால் ஒரு



படம் 2.7 நீர் மூலக்கூறுகளிடையே உள்ள ஹைடிரஜன் பிணைப்பு

நீர்மூலக்கூறைச் சார்ந்த ஒரு ஹைடிரஜன் அணுவின் அணுக்கரு, மற்றொரு நீர்மூலக்கூறின் பகிர்வில் ஈடுபடாத எலெக்ட்ரான்களால் ஈர்க்கப்படலாம். இவ்வாறு, ஏற்படும் பிணைப்புச்சற்று வலுவானதே. இதனால்தான் நீர் உயர்ந்த கொதிநிலையை (100°C)ப் பெற்றிருக்கிறது. இவ்விணைப்பை **ஹைடிரஜன் பாலம்** (hydrogen bridge) என்றும் கூறுவர். ஹைடிரஜன் பாலம் நீருக்கும், பனிக்கட்டிக்கும் மட்டுமல்லாமல் அமோனியா போன்ற வேறு மூலக்கூறுகளிலும் காணப்படுகிறது.

சிறப்பியல்புகள்

1. ஹைடிரஜன் பிணைப்புகள் திசைத்தன்மையுடையனவாய் உள்ளன.
2. இவை முதல்நிலைப்பிணைப்புகள்போல் வலுவில்லாமல் இருந்தாலும் வாயுநிலையிலும், திரவ நிலையிலும் நிலைத்திருக்கத் தேவையான வலுவுடையதாய் உள்ளன.
3. பனிக்கட்டியிலும், நீரிலும் காணப்படும் அசாதாரண பண்புகள் ஹைடிரஜன் பிணைப்பினால் வருகின்றன.
4. மிகக்குறைந்த உருகுநிலையை உடையதாயுள்ளன. பனிக்கட்டியின் உருகுநிலை 0°C ஆகும். ஏனெனில் பிணைப்பு அவ்வளவு வலுவுள்ளதாயில்லை.
5. படிக உருவிலும், படிக உருவமில்லாமலும் உள்ளன. பொதுவாய் இவ்வகைப் பொருள்கள் குறைந்த அடர்த்தி உடையனவாய்க் குறைந்த அணு எண் உடைய தனிமங்களால் ஆன மூலக்கூறுகளால் ஏற்படுகின்றன.
6. நல்ல மின்கடத்தாப் பொருள்களாயும், ஒளிபுகும் ஊடகங்களாயும் விளங்குகின்றன. ஏனெனில், இவற்றில் இணைதிற எலெக்ட்ரான்கள் இல்லை.
7. முனைவுக் கரைப்பான்களிலும், முனைவில்லாக் கரைப்பான்களிலும் இவை கரையும் தன்மை உடையவை.

2.8. அயனிப்படிகங்களின் அணிக்கோவை ஆற்றல்

ஒருபடிகத்தின் இணைப்பாற்றலைக் கணக்கிடுவதானால் அப்பொருளின் எந்திரவியல் பண்புகளையும், மேலும், பல பண்புகளையும் விளக்கலாம். படிக ஆற்றலைக் கணக்கிடுதற்குத் திண்மத்தை உருவாக்கும் அணுக்களிடையே செயல்படும் விசைகளைப் பற்றி நாம் அறிந்திருக்க வேண்டும். இவ்வகையில் எளிதில் படிக ஆற்றலைக் கணக்கிடுதற்கு நாம் அயனிப்படிகங்களை எடுத்துக்கொள்ளலாம். அயனிப்படிகங்களின் இணைப்பாற்றலைப் பார்ன் (Born), மெடுலங் (Madelung) ஆகியோர் கணக்கிட்டனர். சோடியம் குளோரைடுக்குரிய கணக்கீட்டை இங்குக் காண்போம்.

சோடியம் குளோரைடு படிகம், சோடிய அயனிகளாலும் (Na^+) குளோரின் அயனிகளாலும் (Cl^-) ஆனது. இந்த அயனிகளுடைய மின்னூட்டம் கோளச்சமச்சீர் உடையது என்றும், இரு அயனிகளுக்கிடையே உள்ள விசையானது அவற்றிற்கிடையே உள்ள தூரத்தை மட்டிலும் பொறுத்து அமையுமேயன்றித் திசையினைப் பொறுத்து அமையாது என்று கொள்வோம். மேலும், அவற்றினிடையே இருவகையான விசைகள் செயல்படுகின்றன என்றும், அவை நெடிய நெடுக்கம் உள்ள கூலம் விசை எனவும், மற்றொன்று குறுகிய நெடுக்கம் உள்ள எதிர்ப்பு விசை எனவும் கொள்வோம். எதிர்ப்பு விசை எலெக்ட்ரான் திரள்கள் ஒன்றோடு ஒன்று மேற்பொருந்துவதால் வருகிறது என்றும், அது படிகத்தின் அழுந்துந்தன்மையை (compressibility) சார்ந்துள்ளது என்றும் கொள்வோம்.

சோடியம் குளோரைடு படிக அணிக்கோவையில் இரு அயனிகளுக்கு இடையே உள்ள தூரத்தை 'r' எனக் கொள்வோம். அதில் 'A' என்ற சோடிய அயனியை எடுத்துக் கொள்வோம். இது 'r' தொலைவிலுள்ள ஆறு குளோரின் அயனிகளால் சூழப் பெற்றுள்ளது. இந்த ஆறு அயனிகளால் ஏற்படும் கூலம் ஆற்றல் $\frac{-6e^2}{4\pi\varepsilon_o r}$. மேலும் அது $\sqrt{2}\,r$ தொலைவில் உள்ள பன்னிரண்டு சோடிய அயனிகளாலும் சூழப்பட்டுள்ளது. இவற்றால் 'A'க்கு கிடைக்கும் கூலம் ஆற்றல் $\frac{+12e^2}{4\pi\,\varepsilon_o\sqrt{2}\,r}$ ஆகும்.

இதேபோல் $\sqrt{3}\,r$ தொலைவிலுள்ள எட்டுக்குளோரின் அயனிகளால் வரும் கூலம் ஆற்றல் $\frac{-8e^2}{4\pi\,\varepsilon_o\sqrt{3}\,r}$ ஆகும். இவ்வாறே 'A' என்ற சோடிய அயனி '2r' தூரத்திலுள்ள ஆறு சோடிய அயனிகளாலும், $\sqrt{5}\,r$ தூரத்திலுள்ள இருபத்து நான்கு குளோரின் அயனிகளாலும் சூழப்பெற்றுள்ளது. இவ்வாறு படிகத்திலுள்ள எல்லா அயனிகளாலும், Aக்கு கிடைக்கும் ஆற்றலைக் கணக்கிடலாம். அதனால், 'A' என்னும் சோடிய அயனியின் மொத்தக் கூலம் ஆற்றல்,

$$V_{\text{கூலம்}} = \frac{-e^2}{4\pi\,\varepsilon_0\,r}\left[\frac{6}{\sqrt{1}} - \frac{12}{\sqrt{2}} + \frac{8}{\sqrt{3}} - \frac{6}{\sqrt{4}} + \frac{24}{\sqrt{5}} - \cdots\cdots\right] \tag{2.7}$$

இதில் 'e' என்பது ஓர் அயனியின் மின்னூட்டம். ஈர்ப்பாற்றல் எதிர்க்குறியாலும், எதிர்ப்பாற்றல் நேர்க்குறியாலும் குறிக்கப் பெற்றுள்ளன. அயனிகளிடைத்தூரம் அதிகரிக்க அதிகரிக்கக் கூலம்ஆற்றல் குறையுமாதலால் நாம் ஒரு சில அயனிகளால் ஏற்படும் ஆற்றலை மட்டும் கணக்கிலெடுத்துக் கொண்டால் போதுமானது எனக் கொள்ளலாம்.

சமன்பாடு (2.7)இல் $\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_o r}$ னுடைய குணகம் ஒரு மெய்எண் என்பதனையும் அது படிக அமைப்பினை மட்டிலுமே பொறுத்தது என்பதனையும் அறியலாம். சோடியம் குளோரைடுக்கு அக்குணக மதிப்பு 1.748 ஆகும். மேலும், அக்குணகத்தை **மெடுலங் மாறிலி (Madelung constant)** என்றும் கூறுவர். அதனை நாம் 'A'' என்று குறியிடுவோம். அதனால் சமன்பாடு (2.7)ஐப் பின்வருமாறு எழுதலாம்.

$$V_{\text{கூலம்}} = \frac{-A' e^2}{4\pi\varepsilon_o r} \tag{2.8}$$

$$\text{இதில் } A' = \left(\frac{6}{\sqrt{1}} - \frac{12}{\sqrt{2}} + \frac{8}{\sqrt{3}} - \frac{6}{\sqrt{4}} + \frac{24}{\sqrt{5}} \right)$$

$$= 1.748$$

சமன்பாடு (2.8)லிருந்து $V_{\text{கூலம்}}$ மதிப்பு எதிர்க்குறியுடையது என்பதனை அறியலாம். ஓர் அயனியின் மீது மற்ற எல்லா அயனிகளாலும் ஏற்படும் சராசரி ஆற்றலே ஈர்ப்பாற்றல் ஆகும். இந்த ஈர்ப்பாற்றலின் ஆளுகை மட்டும் இருந்தால் அணிக்கோவை சிதைவுறும். இதனைக் தடுக்க அயனிகளிடையே எதிர் விசைகள் செயல்படுகின்றன. இரு அயனிகள் மிகவும் நெருங்கி வரும்போது அவற்றினுடைய இணைதிறக்கூடு எலெக்ட்ரான்கள் மேற்பொருந்தத் தொடங்கும்; அதனால், எதிர்விசை ஒன்றுதோன்றிச் சமநிலை ஏற்படுத்தும். இவ்வெதிர்விசையால் அயனிகள் எதிர்த்துத்தள்ளப்பட்டு விலக்கப்படுகின்றன. பார்ன் இதனை $\frac{B'}{r^n}$ என்று குறிப்பிடலாம் என்று கூறி மேலும் B', n ஆகியவற்றின் மதிப்புத் திண்மத்திலுள்ள அயனிகளின் பண்பையொட்டி அமையும் எனவும் கூறினார். மற்ற எல்லா அயனிகளாலும் ஒரு தனி அயனி பெறும் எதிர்விசை

$$V_{\text{எதிர}} = \frac{B'}{r^n} \tag{2.9}$$

அதனால், நாம் எடுத்துக்கொண்ட ஒரு தனி அயனியின் மொத்த ஆற்றல்,

$$\boxed{\mathbf{V(r) = \frac{-A'e^2}{4\pi\,\varepsilon_o r} + \frac{B'}{r^n}}} \tag{2.10}$$

ஒரு படிகத்தில் ஒரு கிலோகிராம் சோடியம் குளோரைடு மூலக்கூறு அடங்கியுள்ளதாயும், ஒரு கிலோ கிராம் மூலக்கூறில் 'N' சோடிய அயனிகளும், 'N' குளோரின் அயனிகளும் இருப்பதாயும் கொள்வோம். அப்படிகத்தின் மொத்த ஆற்றல்,

$$V(r) = \frac{-NA' \; e^2}{4\pi \, \varepsilon_o \, r} + \frac{NB'}{r^n} + N\Delta E \tag{2.11}$$

இதில் ΔE என்பது சோடிய அணுவிலிருந்து குளோரின் அணுவிற்கு ஓர் எலெக்ட்ரான் செல்லும்போது அதிகமாகும் நிலை ஆற்றலாகும்.

$$\Delta E = \text{சோடியஅணுவின் முதல் அயனியாக்க ஆற்றல்} - \text{குளோரின் அணுவின் எலெக்ட்ரான் கவர்ச்சி ஆற்றல்}$$

$= 5.1 - 3.8 = 1.3$ எலெக்ட்ரான் வோல்ட்/மூலக்கூறு.

ஆனால், மிக வலிவுடைய அயனிப்பிணைப்பில், குறிப்பாய்ச் சீசியம் குளோரைடில் ΔEன் மதிப்புச் சுழிக்கு அருகில் இருக்கும். மேலும், எதிர்ப்பு விசையிலுள்ள r^n என்னும் உறுப்பிலுள்ள n இன் மதிப்பு, 9 லிருந்து 15 வரை மாறுகிறது. படிகம் சுழி கெல்வின் வெப்பநிலையில் உள்ளதெனக் கொண்டால் சமநிலையில் V(r) இன் மதிப்பு ஒரு சிறுமமாக இருக்க வேண்டும். இந்நிலையில் $r = r_o$ எனக்கொள்வோம். இங்கு, r_o என்பது சுழிகெல்வின் வெப்பநிலையில் மிகக்குறைந்த அயனியிடைத் தூரத்தைக் குறிக்கிறது. இச்சிறும மதிப்பிற்குரிய நிபந்தனை $\left[\frac{dV}{dr}\right]_{r=r_0} = 0.$ எனவே

$$\left[\frac{dV}{dr}\right]_{r=r_0} = \frac{N\,A'\,e^2}{4\pi\,\varepsilon_o r_o^2} - \frac{N\,B'\,n}{r_o^{n+1}} = 0$$

$$\therefore B' = \frac{A'\,e^2\,r_o^{n-1}}{4\pi\,\varepsilon_o\,n}$$

$$\boxed{\therefore V(r_o) = V_o = \frac{-NA'\,e^2}{4\pi\,\varepsilon_o\,r_o}\left(1 - \frac{1}{n}\right)} \tag{2.12}$$

இங்கு V_o என்பது சுழி கெல்வின் வெப்பநிலையில் சமநிலை ஆற்றல் ஆகும். இதனை **அணிக்கோவை ஆற்றல்** அல்லது **படிகத்தின் இணைப்பாற்றல்** எனக் கூறுவர். ஒரு படிகத்தை உருவாக்கும்போது அதன் ஆக்கக்கூறுகளால் அமையும் அயனிகளைப் படிக அணிக்கோவையில் அவ்வவற்றின் இடங்களில் அமர்த்தும்போது வெளியிடப்படும் ஆற்றலே படிகத்தின் அணிக்கோவை ஆற்றலாகும். அயனிப் படிகத்தை அதன் ஆக்கக்கூறு அயனிகளாகத் தனித்தனியே பிரிப்பதற்கு இந்த அளவு ஆற்றல் தேவை என்பதனையும்

அட்டவணை 2.3

பிணைப்புகளின் பண்புகள்

	பண்பு	அயனிப் பிணைப்பு	சக பிணைப்பு	உலோகப் பிணைப்பு	வான்டெர்வால்ஸ் பிணைப்பு	ஹைடிரஜன் பிணைப்பு
1.	எந்திரப் பண்புகள்	வலுவான கடின படிகங்கள்	வலுவான கடின படிகங்கள்	நடுத்தர வலிமை உடையன	வலுக்குறைந்தவை	வலுக்குறைந்தவை
2.	வெப்பப் பண்புகள்	உயர்உருகுநிலை, தாழ்ந்த வெப்ப விரிவு எண்கள்	உயர் உருகு நிலை, தாழ்ந்த வெப்ப விரிவு எண்கள்	மாறுபடும் உருகுநிலை, இடைத்தர வெப்ப விரிவு எண்கள்	தாழ்ந்த உருகுநிலை, உயர்ந்த வெப்ப விரிவு எண்கள்	தாழ்ந்த உருகுநிலை, உயர்ந்த வெப்ப விரிவு எண்கள்
3.	மின் பண்புகள்	உலர்ந்த, தூய்மையான நிலையில் நல்ல மின்கடத்தாப் பொருள்கள்	திண்ம நிலையிலும், உருகிய நிலையிலும் மின்கடத்தாப் பொருள்கள்	நல்ல மின் கடத்திகள்	மின்கடத்தாப் பொருள்கள்	மின்கடத்தாப் பொருள்கள்
4.	ஒளிப் பண்புகள்	நடுத்தர ஒளிபுகும் பொருள்கள்	ஒளி புகும் பொருள்கள்	ஒளிபுகாப் பொருள்கள்	ஒளி புகும் பொருள்கள்	ஒளிபுகும் பொருள்கள்
5.	கரையும் தன்மை	முனைவுக்கரைப்பான் களில் மட்டும் கரையும்	முனைவில்லாக் கரைப்பான்களில் மட்டும் கரையும்	கரையும் தன்மை குறைவு	முனைவு, முனைவில்லாக் கரைப்பான்களில் கரையும்	முனைவு, முனைவில்லாக் கரைப்பான்களில் கரையும்
6.	இயலமைப்புப் பண்புகள்	திசைத்தன்மையற்ற இயலமைப்பு	திசைத் தன்மையுடைய இயலமைப்பு	திசைத்தன்மையற்ற இயலமைப்பு	திசைத்தன்மையற்ற இயலமைப்பு	திசைத்தன்மையுடைய இயலமைப்பு
7.	பிணைப்பு ஆற்றல்	மிக அதிகம்	மிக அதிகம்	நடுத்தரம்	மிகக்குறைவு	மிகக்குறைவு
8.	அணு இடைத்தூரம்	மிகக்குறைவு	மிகக்குறைவு	நடுத்தரம்	அதிகம்	அதிகம்

இதனால் அறியலாம். **ஒட்டு ஆற்றல்** (cohesive energy) என்பது ஒரு மூலக்கூறைப் படிகத்தில் இணைக்கத்தேவையான ஆற்றலாகும். அதன் மதிப்பு $\frac{V_o}{N}$ ஆகும். அதனால்

$$\text{ஒட்டு ஆற்றல்} = \frac{A' e^2}{4\pi\varepsilon_0 r_o} \left(1 - \frac{1}{n} \right)$$

சோடியம் குளோரைடு படிகத்தில் $r_o = 2.82$ ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகள் எனவும். $n = 9.5$ எனவும் கொண்டால் $\frac{A' e^2}{4\pi\varepsilon_o r_o} = 8.94$ எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டுகள் எனக் கிடைக்கும். அதனால் இதன் மதிப்பினை மேற்கண்ட சமன்பாட்டில் இட, ஒட்டு ஆற்றல் சோடியம் குளோரைடு படிகத்தில் 7.95 எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டுகள் எனக் கிடைக்கும். மற்ற அயனிப்படிகங்களுக்கு 'n' இன் மதிப்பினைப்பின்வரும் சமன்பாட்டினால் கண்டறியலாம்.

$$n = 1 + \frac{72\pi\,\varepsilon_o\, r_o^4}{A' e^2 \beta_o} \tag{2.13}$$

இதில் β_o என்பது சுழிகெல்வின் வெப்பநிலையில் படிகத்தின் அழுந்தும் தன்மையாகும். மேலும், அயனியிடைத்தூரத்தை எக்ஸ்கதிர் விளிம்பு விளைவு சோதனைகளின் மூலம் கணக்கிடலாம். அட்டவணை 2.3 இல் பிணைப்புகளின் பண்புகள் தொகுத்துத்தரப்பட்டுள்ளன.

மாதிரிக் கணக்குகள்

1. ஹைடிரஜன் புளோரைடு மூலக்கூறில் மின் இருமுனைவுத் திருப்புத் திறனும், இணைப்பு நீளமும் முறையே 1.98 டிபை அலகுகளும், 0.92 ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகளுமாகும். எலெக்ட்ரான் பகிர்வின்போது புளோரின் அணுவிற்குக் கிடைக்கும் செயலுறு எதிர்மின்னூட்டத்தைக் கணக்கிடுக

$$\mu = e'd$$

$$e' = \frac{\mu}{d} = 1.98 \times \frac{10^{-29}}{3} \times \frac{1}{0.92 \times 10^{-10}}$$

$$e' = 0.72 \times 10^{-19} \text{ கூலம்.}$$

2. சோடியம் குளோரைடின் அழுந்தும் தன்மையும், அணிக்கோவை மாறிலியும் முறையே 3.3×10^{-11} மீ²/நியூட்டன், 5.63 ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகள் ஆகும். இவற்றைப் பயன்படுத்தி படிகத்தின் அணிக்கோவை ஆற்றல் சமன்பாட்டின் ஒரு பகுதியாய எதிர்ப்புவிசையிலுள்ள n இன் மதிப்பினைக் கணக்கிடு; அணிக்கோவை ஆற்றலையும் கணக்கிடுக.

சோடியம் குளோரைடின் மெடுலங் மாறிலி $A' = 6 - \frac{12}{\sqrt{2}} + \frac{8}{\sqrt{3}} - \frac{6}{\sqrt{4}} + \frac{24}{\sqrt{5}}$

$$= 1.748$$

$$n = 1 + \frac{72\,\pi\,\varepsilon_0\,r_o^4}{A'\,e^2\,\beta_o}$$

$$= 1 + \frac{72\,\pi \times 8.85 \times 10^{-12} \times (2.815)^4 \times 10^{-40}}{1.748 \times (1.6 \times 10^{-19})^2 \times 3.3 \times 10^{-11}}$$

$$= 1 + 8.5 = 9.5$$

$$V_o = \frac{A'\,e^2\,N}{4\pi\,\varepsilon_0\,r_o}\left(1 - \frac{1}{n}\right)$$

$$= \frac{1.748 \times (1.6 \times 10^{-19})^2 \times 6.02 \times 10^{26}}{4\pi \times 8.85 \times 10^{-12} \times 2.815 \times 10^{-10}}\left(1 - \frac{1}{9.5}\right)$$

$= 769.5$ கிலோஜூல்/மோல்

சுருக்கம்

1. அணுஇடைப்பிணைப்புகள், எலெக்ட்ரான்களை இழப்பதாலோ, ஏற்பதாலோ, பகிர்வதாலோ ஏற்படுகின்றன. இங்ஙனம் ஏற்படும் பிணைப்புகள் வலுவுள்ளதாய் இருக்கும். இவற்றை முதன்மைப் பிணைப்புகள் என்பர். மேலும் அணுஇடைப் பிணைப்புகள் தூண்டப்பட்ட மின்இருமுனைவுகளாலும் ஏற்படும். இவ்வாறு ஏற்படும்பிணைப்புகள் வலுவற்றதாயிருக்கும். இவற்றை இரண்டாம் நிலைப் பிணைப்புகள் என்பர்.

2. அயனிப் பிணைப்பில் எலெக்ட்ரான்கள், ஓர் அணுவிலிருந்து இன்னோர் அணுவிற்கு அளிக்கப்படுகின்றன. இவ்வாறு நேர் மின்னூட்டமும் எதிர்மின்னூட்டமும் உள்ள அயனிகள் உருவாகி ஈர்ப்புவிசை தோன்றுவதால் வலுவான அயனிப்பிணைப்பு ஏற்படுகிறது.

3. சகபிணைப்பில் எலெக்ட்ரான்கள் இருஅணுக்களிடையே பகிர்ந்து கொள்ளப்படுகின்றன. பிணைப்பில் பங்குகொள்ளும் எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை கூடும்போது பிணைப்பின் வலுவும் கூடுகிறது.

4. உலோகப் பிணைப்பில் எலெக்ட்ரான்கள் அணிக்கோவைப்புள்ளிகளிலுள்ள உலோக அயனிகளால் ஈர்க்கப்படுகின்றன. இவை சற்று வலுக்குறைந்தவை.

5. இரண்டாம் நிலைப்பிணைப்புகளாய வான்டெர்வால்ஸ் பிணைப்பும், ஹைடிரஜன் பிணைப்பும் வலிவு குறைந்தவை. பெரும்பாலும் மிகத்தாழ் வெப்பநிலைகளில் இவ்வகைப் பிணைப்புகள் ஏற்படுகின்றன.

6. திண்மப் பொருள்களின் அணுக்களிடையே ஈர்ப்புவிசையும், எதிர்ப்புவிசையும் செயல்படுகின்றன. ஈர்ப்புவிசை, நிலைமின்கூலம் விசையாலும், எதிர்ப்பு விசை எலெக்ட்ரான் திரள்கள் ஒன்றோடுஒன்று மேற்பொருந்துவதாலும், பொருளின் அழுந்தும் தன்மையாலும் வருகின்றன.

7. அணிக்கோவை ஆற்றல் என்பது அணுக்களை (அயனிகளைப்) படிக அணிக்கோவையில் அவ்வவற்றின் இடங்களில் அமர்த்தும்போது வெளியிடப்படும் ஆற்றல் ஆகும்.

8. மெடுலங் மாறிலி அயனிப்படிகங்களில் அயனிகளுக்கிடையே உள்ள ஈர்ப்புவிசையைக் கணக்கிட உதவுகிறது. இது படிக அமைப்பைச் சார்ந்துள்ளது.

வினாக்கள்

1. திண்மநிலைப் பொருள்களிடையே காணும் பல்வேறு பிணைப்புகளைக்கூறி அவற்றின் பண்புகளை விளக்குக.
2. அயனிப்பிணைப்பு, சகபிணைப்பு என்றால் என்ன? உதாரணங்கள் கொடுக்கவும்; இரண்டிற்கும் உள்ள வேறுபாடுகளை அட்டவணைப்படுத்துக.
3. இரண்டாம் நிலைப்பிணைப்புகள் எங்ஙனம் ஏற்படுகின்றன என்பதனையும் அவற்றின் பண்புகளையும் கூறுக
4. சோடியம் குளோரைடு படிகத்தின் அணிக்கோவை ஆற்றலைக் கண்டுபிடிக்கத் தேவையான கோவையைத் தருவி

மேற்கோள் நூற்பட்டியல்

1. 'An introduction to solid state physics and its applications' – R.J. Elliott and A.F.Gibson, The Macmillan Press Ltd, London, 1976.
2. 'Materials Science and Engineering' – V. Raghavan, Prentice – Hall of India Private Limited, New Delhi, Fourth Edition, 1990.
3. 'Physics of Solids' – C.A. Wert and R.M. Thomson, Mc. Graw Hill, New York, Second Edition, 1970.

3. அடிப்படைப் படிகவியல்

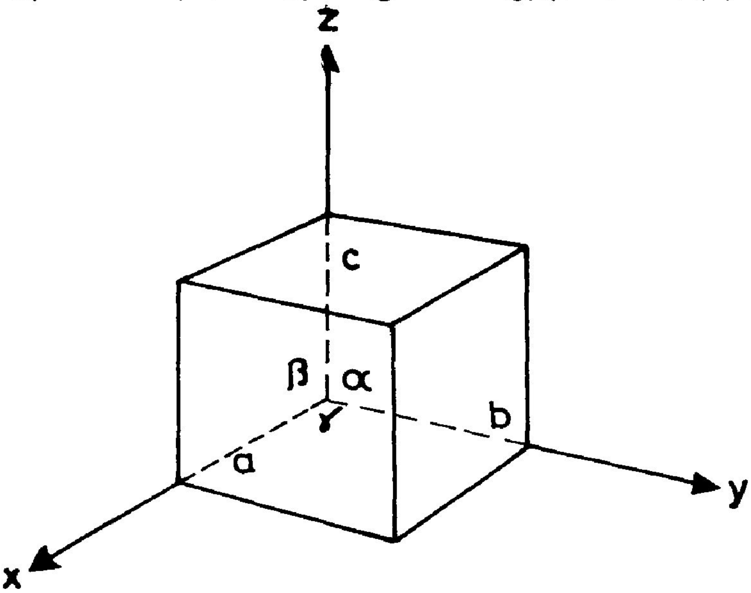
3.1. அறிமுகம்

இராண்ட்ஜனின் கண்டுபிடிப்பாய எக்ஸ்கதிர்கள் படிகவியலின் முன்னேற்றத்தில் பெரும்பங்கு கொண்டுள்ளன. படிகங்களின் இயலமைப்புகளை (structures) அறிந்து அவற்றைப் பிரித்து வகைப்படுத்துவதைப்பற்றிக் குறிப்பிடுவதே படிகவியலாகும். பொருள்களைப் படிகங்கள், படிக உருவமற்ற பொருள்கள் என இரு வகையாகப் பிரிக்கலாம். படிக உருவமில்லாப் பொருள்களின் இயற்பியற் குணங்கள், வேதியியற் குணங்கள் எல்லாத் திசைகளிலும் ஒன்றாயிருக்கும். திசைக்குத் திசை மாறுபடாத குணங்களைப் பெற்ற பொருள்களுக்குத் **திசை சாராப் பண்பியலாய பொருள்கள்** (isotropic substances) எனப் பெயர். படிகத்திற்குள் இயற்பியற் குணங்கள், வேதியியற் குணங்கள் எல்லாத் திசைகளிலும் ஒரே மாதிரியாயிராது. திசைக்குத்திசை மாறுபட்ட இயற்பியல் குணங்களைப் பெற்ற பொருள்களுக்குத் **திசைசார்ந்த பண்பியலாய பொருள்கள்** (anisotropic substances) எனப் பெயர். படிகங்கள் உடையும் பொழுது ஒழுங்கான முறையில் உடையும். அதேபோல் அவை உருகும்பொழுது ஒரு குறிப்பிட்ட உருகுநிலையில் துல்லியமாய் உருகும். படிகமற்ற பொருள்கள் உடைந்தால் உடைந்த துண்டுகள் ஒழுங்கற்றனவாய் இருக்கும். மேலும் படிகஉருவமில்லாப் பொருள்கள் ஒரு குறிப்பிட்ட உருகுநிலையில் துல்லியமாய் உருகுவதில்லை. படிகங்களின் இயலமைப்புகள் எக்ஸ்கதிர் விளிம்புவிளைவு முறையிலும், நியூட்ரான் விளிம்பு விளைவு முறையிலும் கண்டுபிடிக்கப்படுகின்றன. படிகங்களின் இயலமைப்புகளினால் ஒரு படிகத்தின் வெப்பப்பண்புகள், மின்பண்புகள், ஒளிப்பண்புகள் ஆகியவற்றைப் பற்றித் தெரிந்துகொள்ளலாம்.

3.2. சில அடிப்படை வரையறைகளும், படிக வகைகளும்

படிகத்தின் வெளித்தோற்றம், சமச்சீர் (symmetry) இவற்றைக் கொண்டு, படிகம் அதனுள்ளும் ஓர்ஒழுங்கான அமைப்பைப் பெற்றிருக்க வேண்டும் எனப் படிகவியல் வல்லுநர்கள் கருதினர். படிகத்தில் எல்லா அணுக்களும் குறிப்பிட்ட இடை வெளி தூரத்தில் முப்பரிமாணங்களிலும் (x, y, z என்ற மூன்று செங்குத்து அச்சுகளின் திசைகள்) ஒழுங்கான முறையில் அடுக்கப் பெற்றிருக்கும். இங்ஙனம் அணுக்களிடையே ஒரு குறிப்பிட்ட இடைவெளிவிட்டு அவைகளை அமர்த்தும்போது வரும் வரிசையை 'மடக்குநிலை வரிசை (periodic array)' என்பர். அணிக்கோவை (lattice)ப் புள்ளிகள், படிகங்களின் அணுக்களின் இடத்தையோ, மூலக்கூறுகளின் இடத்தையோ, பல அணுக்கள் சேர்ந்த தொகுப்பின் மையத்தையோ குறிக்கின்றன. இட அணிக்கோவை (space lattice) என்பது முப்பரிமாண அணிக்கோவைக்கு மறுபெயர். இடஅணிக்கோவையில் ஒரு புள்ளியைச் சூற்றியிருக்கும் சூழ்நிலையே மற்றப்புள்ளிகளையும் சுற்றியிருக்கும். ஒரு

படிகத்தை கையில் எடுத்து அதனைக் கவனித்தால், கவனிப்பவரின் திசையை நோக்கி உள்ள அச்சிற்கு 'x' அச்சு எனவும், x அச்சுக்குச் செங்குத்தாயும், அதற்கு வலப்புறம்



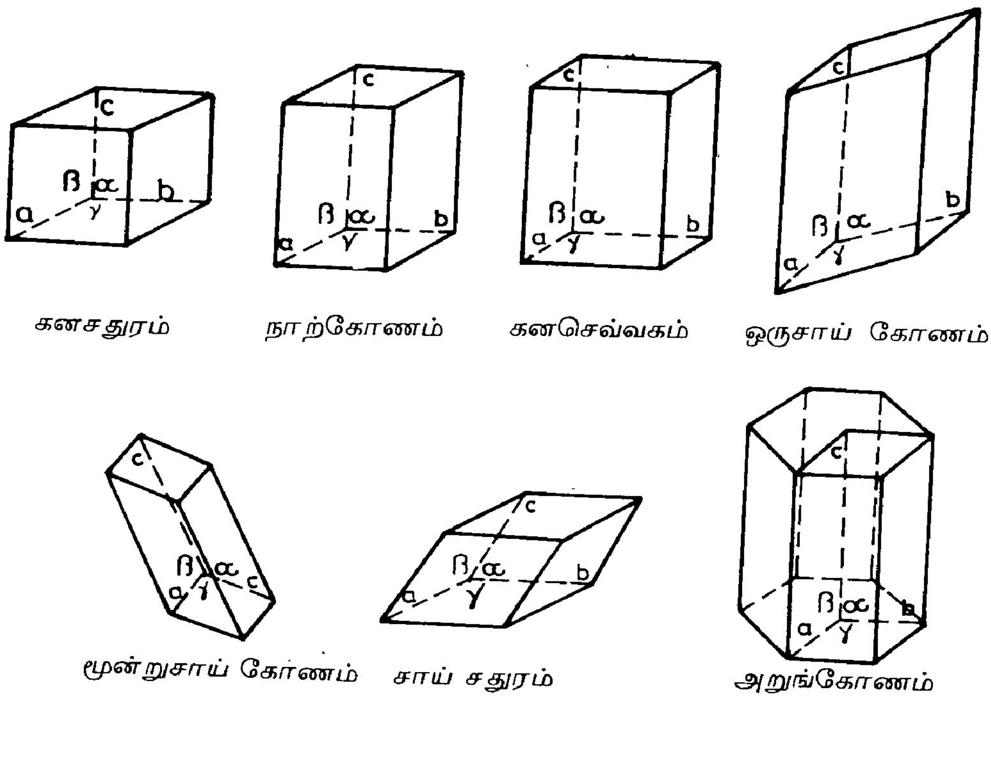
படம் 3.1 படிக அச்சுகளும், அவற்றிற்கிடையே உள்ள கோணங்களும்

உள்ள அச்சுக்கு 'y' அச்சு எனவும், இவ்விரண்டு அச்சுகளுக்கும் செங்குத்தாயுள்ள அச்சிற்கு நிலைக்குத்து அச்சு அல்லது 'z' அச்சு எனவும் வழங்கப்படுகிறது. 'y' அச்சிற்கும், 'z' அச்சிற்கும் இடையேயுள்ள கோணம் 'α' ஆகும். இதுபோல் 'z' அச்சிற்கும், 'x' அச்சிற்கும் இடையே உள்ள கோணம் 'β' ஆகும். 'x' அச்சிற்கும், 'y' அச்சிற்கும் இடையே உள்ள கோணம் 'γ' ஆகும் (படம் 3.1). மேற்சொன்னவாறு படிக அச்சுகளைத் தேர்ந்தெடுத்தபிறகு இம் மூன்று அச்சுகளையும் வெட்டக்கூடிய ஒருதளம் வரையறுக்கப்படுகிறது. இத்தளத்திற்கு அலகுதளம் (unit plane) என்பது பெயர். இத் தளம் x அச்சில் a அலகு நீளத்தையும், y அச்சில் b அலகு நீளத்தையும், z அச்சில் c அலகு நீளத்தையும் வெட்டுவதாய்க் கொண்டால், a,b,c என்னும் மூன்று நீளங்கள் படிகத்தின் துணையலகுகள் எனக் கூறப்படுகின்றன. மேற்கூறிய மூன்று நீளங்களும் எல்லாப் படிகங்களுக்கும் ஒன்றாயிராது ; படிகத்தின் உருவத்திற்குத் தகுந்தாற்போல் மாறுபடும். a,b,c என்னும் மூன்று நீளங்களும், α,β,γ என்னும் மூன்று அச்சு இடைக் கோணங்களும் தெரிந்தால் அப்படிகத்தின் அமைப்பு, அளவு முதலியவற்றைத் தெரிந்துகொள்ளலாம். துணையலகுகள் a,b,c யும், அச்சு இடைக் கோணங்கள் α,β,γ வும் படிகத்தின் **வடிவ மாறிலிகள்** (geometrical constants) என வழங்கப்படுகின்றன.

படிகங்களின் அமைப்பினைப் பொறுத்து அவை ஏழு வகைகளாகப் பிரிக்கப்பட்டுள்ளன. இது படிகத்தின் ஏழு சமச்சீர் வகைகள் (symmetry systems) என வழங்கப்படுகிறது. ஏழு வகைகளின் படங்களும், அவற்றைப் பற்றிய குறிப்புகளும் படம் 3.2 இல் தெளிவாகக் கொடுக்கப்பட்டுள்ளன. மேலும் அட்டவணை 3.1 இல் ஏழு வகைப் படிகங்களின் அச்சு விகிதங்களும், அச்சு இடைக் கோணங்களின் அளவுகளும் உதாரணங்களுடன் கொடுக்கப்பட்டுள்ளன.

அலகு செல் (Unit cell), **மூல அலகு செல்** (Primitive cell)

படிகத்தின் இயலமைப்பினைப் புரிந்துக்கொள்ள அதன் அணிக்கோவை முழுவதையும் தெரிந்துகொள்ள வேண்டிய தேவையில்லை. அதற்குமாறாய் அணிக்கோவை முழுவதையும் பிரிதிபலிக்கக்கூடிய அதன் மிகச்சிறுபகுதியொன்றனை எடுத்துக் கொண்டால் போதும். இந்த மிகச்சிறு பகுதியினை முப்பரிமாணங்களிலும் திரும்ப, திரும்ப அடுக்குவதனால் படிகத்தைப் பெறலாம். இந்த மிகச்சிறு அடிப்படை இயலமைப்பே அலகு செல் என அழைக்கப்படுகிறது. இதனைச் சுவரிலுள்ள செங்கல்லோடு ஒப்பிடலாம். சுவரைப் படிகமென்று எடுத்துக் கொண்டால் அச்சுவரில் வரிசை வரிசையாய் அடுக்கி வைக்கப்பட்ட செங்கற்கள் அலகு செல்களுக்கு ஒப்பாகும். சுவரினுடைய உருவ அமைப்புச் செங்கல்லின் உருவ அமைப்பைச் சார்ந்துள்ளதுபோல் படிகத்தின் உருவ அமைப்பும் அதிலுள்ள அலகுசெல்லின் உருவ அமைப்பினைச் சார்ந்துள்ளது. $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ என்னும் வெக்டார்களால் வரையறுக்கப்படும் அலகு செல் மூல அலகுசெல் என அழைக்கப்டுகிறது. ஒவ்வொரு மூல அலகு செல்லிலும் ஒரேயோர் அணிக்கோவைப் புள்ளி தான் இருக்கும். இரண்டு அல்லது அதற்கு மேற்பட்ட புள்ளிகள் இருந்தால் அவை மூல அலகு செல்கள் ஆகா. மேலும் மூல அலகு செல் ஓர் அலகு செல்லாய் இருக்கலாம். அஃதாவது, ஓர் எளிய கனசதுரப் படிகத்தை எடுத்துக் கொண்டால், அதன் அலகு செல்லும் மூல அலகு செல்லும் சமம்.



படம் 3.2 ஏழு படிகவகைகள்

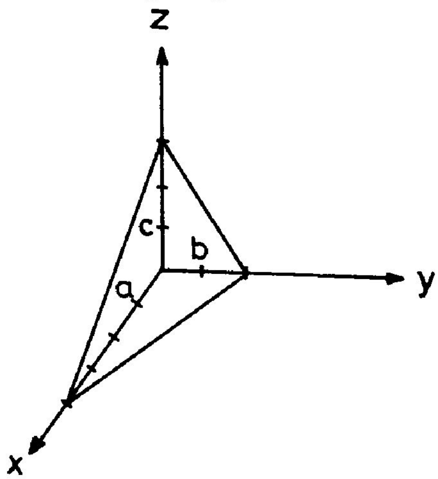
ஆனால் ஒவ்வொரு அலகு செல்லும் மூல அலகு செல்லாக இருக்கத் தேவையில்லை. ஏனெனில் பெரும்பாலும் அலகு செல்லில் இரண்டனுக்கு மேற்பட்ட அணிக்கோவைப் புள்ளிகள் உள்ளன. இவ்வித அலகு செல்களால் உருவாகும் அணிக்கோவைகளைக் கீழ்க்காணும் குறியீடுகளால் குறிப்பிடுதல் வழக்கம்.

மூல அணிக்கோவை	(primitive lattice)	–	P
உருவ மைய அணிக்கோவை	(body centred lattice)	–	I
முகமைய அணிக்கோவை	(face centred lattice)	–	F
அடிமைய அணிக்கோவை	(base centred lattice)	–	C

3.3. *மில்லர் எண்கள்* (Miller indices)

படிகங்களில் படிக தளங்களையும், திசைகளையும் எளிதாய்க் குறிப்பிடப் பயன்படும் மூன்று எண்களின் தொகுதியை '*மில்லர் எண்கள்*' என்கிறோம். படிகவியலில் இட அணிக்கோவையினூடே செல்லும் தளங்களில் ஏதேனும் ஒன்றனைக் குறிப்பிட்டுச் சொல்ல வேண்டியிருக்கும். அதனால், ஒவ்வொரு தளங்களுக்கும் உரிய மில்லர் எண்களைக் கண்டுபிடிக்கப் பின்வரும் வழியைக் கையாளுகிறோம்.

(அ) x, y, z என்பன மூன்று படிக அச்சுகள் எனவும், a, b, c என்பன இட அணிக்கோவையின் அச்சுகளில் உள்ள ஓரலகு வெக்டார்கள் எனவும் கொள்வோம்.

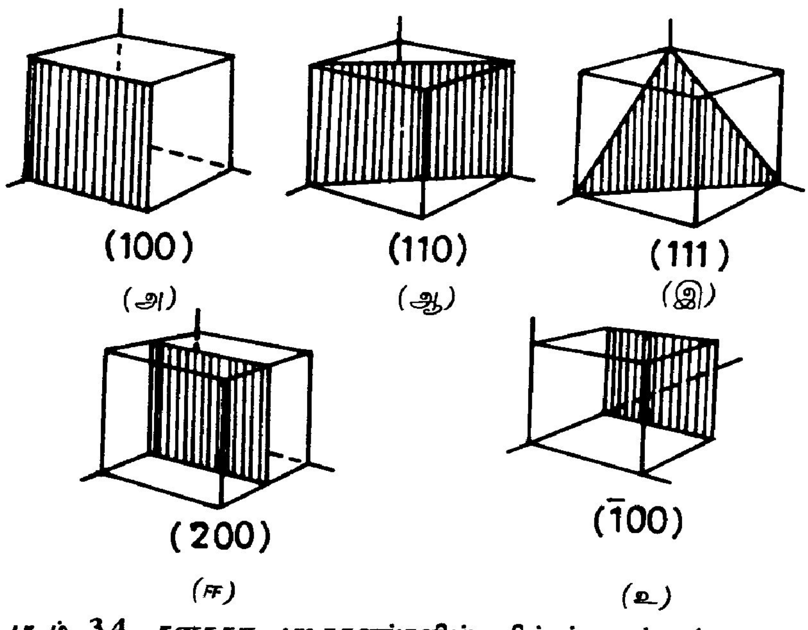


படம் 3.3 ஒரு தளத்தின் மில்லர் எண்களைக் கண்டுபிடிக்கும் முறை

(ஆ) குறிப்பிட்ட தளம் மேற்சொன்ன அச்சுகளில் எவ்வளவு அலகு வெட்டுத்துண்டுகளை(intercepts)த் தனித்தனியாய் உண்டாக்குகிறது என்று கணக்கிடவேண்டும். படம் 3.3 இல் காட்டியவாறு இவற்றை 4a, 2b, 3c என எடுத்துக்கொள்வோம். இவற்றை முறையே அதனதன் அலகு நீளங்களால் வகுக்க 4, 2, 3 என்றாகும்.

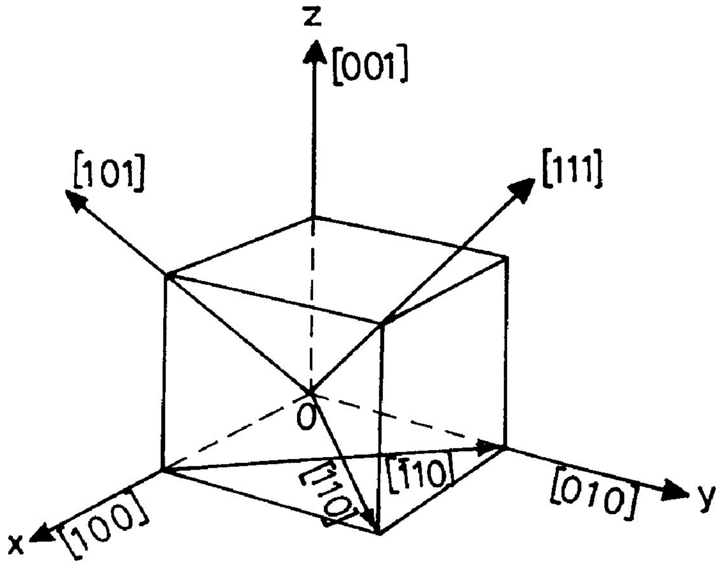
(இ) இவ்வெட்டுத்துண்டுகளின் தலைகீழ் மதிப்பினைக் கணக்கிட வேண்டும். மேற்கூறப்பட்ட வெட்டுத்துண்டுகளுக்குத் தலைகீழ் மதிப்புகள் 1/4, 1/2, 1/3 ஆகும்.

(ஈ) கண்டுபிடிக்கப்பட்ட தலைகீழ் மதிப்புகள் பின்னங்களாய் இருக்கும். இவற்றைப் பொதுஎண்ணால் பெருக்கி, முழு எண்களாக்க வேண்டும். பெரும்பாலும் வரும் முழு எண்கள் மிகச்சிறிய எண்களாய் இருக்குமாறு கணக்கிடவேண்டும். படம் 3.3 (அ) வில் காட்டிய உதாரணத்திற்கு வரும் மிகச்சிறிய முழு எண்கள் (3, 6, 4) ஆகும். இத்தொகுதியையே (3 6 4) மில்லர் எண்கள் என்கிறோம். பொதுவாக மில்லர் எண்கள் ($h\,k\,l$) எனக் குறிப்பிடுவது வழக்கம். தளம் ஓர் அச்சிற்கு இணையாய் உள்ளபோது அவ்வச்சில் அத்தளம் உண்டாக்கும் வெட்டுத் துண்டு வரையிலி (∞) ஆகும். அதனால், அத் திசைக்கு மில்லர் எண் சுழியாகும். படிகவியலில் குறிப்பிடப்படும் அச்சுகள் மேற்கோள் (reference) அச்சுக்களேயாகும். இந்த அச்சுக்கள், தோற்றுவாயிலிருந்து நேர்த்திசையிலும் எதிர்த்திசையிலும் (negative direction) நீண்டு இருக்கின்றன. ஆகையால் ஒருகுறிப்பிட்ட தளம் எதிர்த்திசை 'x' அச்சில் தலைகீழ் அணிக்கோவையில் (reciprocal lattice), h வெட்டுத்துண்டுகளை வெட்டினால் அதன் மில்லர் எண்ணை $\bar{h}$ எனக் குறிப்பிடுகிறோம். படிகவியலில் சமமான தளங்களின் தொகுப்பின் மில்லர் எண்களை {hkl} என்று குறிப்பிடுதல் வழக்கம். ஒருகனசதுர படிகத்தில் {100} என்பது படிகத்தின் ஆறுமுகங்களை (faces) முறையே (100), (010), (001), $(\bar{1}00)$, $(0\bar{1}0)$, $(00\bar{1})$ ஆகியவற்றைக் குறிக்கிறது. பல இணைதளங்களில் (parallel planes) ஒவ்வொரு தளமும் சமதூரத்தில் இருந்தால் அவை எல்லாவற்றுக்கும் மில்லர் எண்கள் ஒன்றேயாகும். அஃதாவது, தோற்றுவாய் வழியாகச்செல்லும் தளத்தின் மில்லர் எண்கள் அதற்கு இணையாகச்



படம் 3.4 கனசதுர படிகதளங்களின் மில்லர் எண்கள்

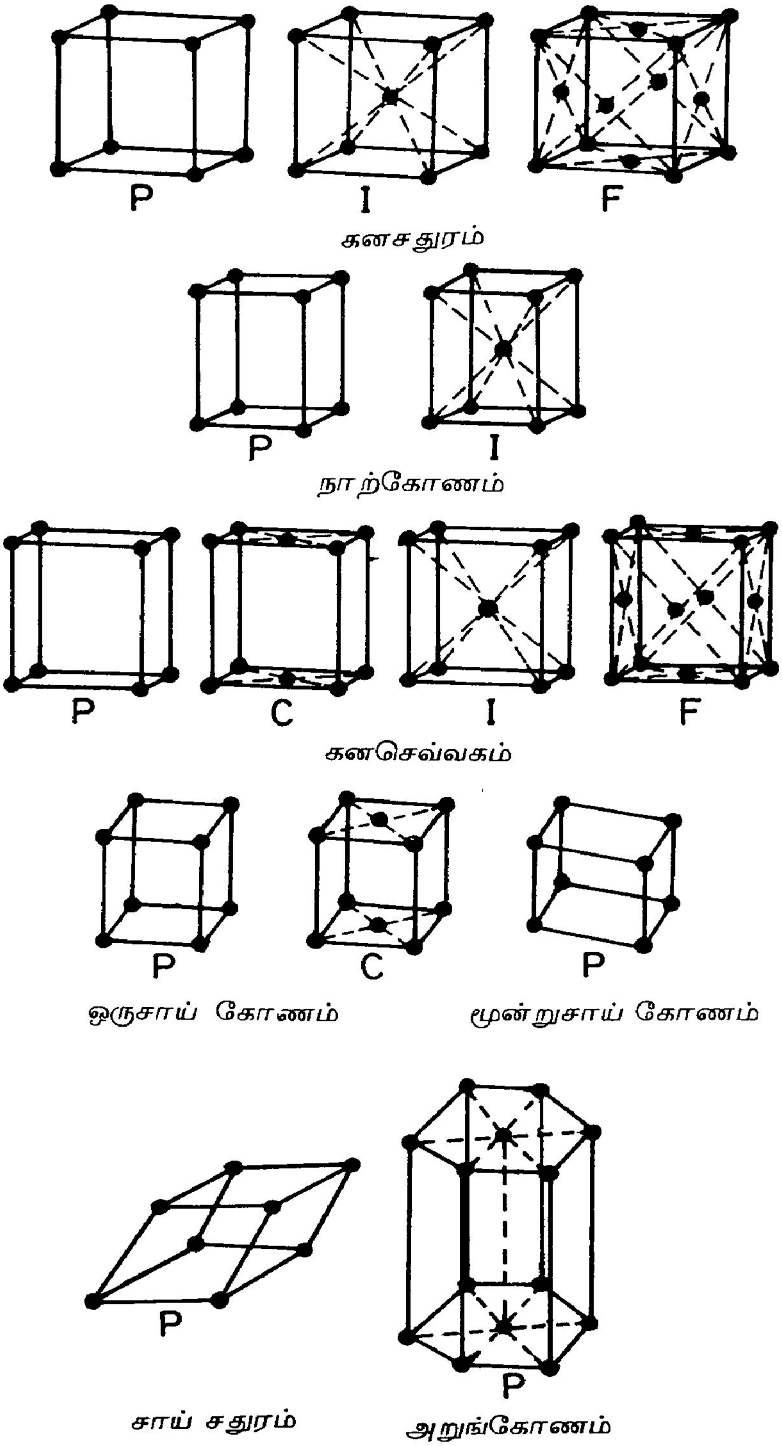
செல்லும் மற்றத் தளங்களின் மில்லர் எண்களுக்குச் சமமாகும். படம் 3.4 (அ) வில் ஒரு கனசதுரத்தில் 'x' அச்சிற்குச் செங்குத்தாயுள்ள தளம் (100) என்ற மில்லர் எண்களை உடையதாய்க் காட்டப்பட்டுள்ளது. இதேபோல் 3.4 (ஆ) வில் x, y அச்சுகளுக்கு செங்குத்தாயுள்ள தளம் (110) என்று காட்டப்பட்டுள்ளது. மூன்று அச்சுகளிலும் ஒருகுறிப்பிட்ட தளம் ஒரே மதிப்புள்ள வெட்டுத்துண்டுகளை வெட்டினால் அத் தளத்தின் மில்லர் எண்கள் (111) ஆகும். இதனைப் படம் 3.4 (இ) காட்டுகிறது. படம் 3.4 (உ) வில் 'x' அச்சுக்குச் செங்குத்தாய் எதிர்த்திசையில் உள்ளதுமான ($\bar{1}00$) தளம் காட்டப்பட்டுள்ளது. ஒரு படிகத்தில் திசையைக் காட்டும் மில்லர் எண்களைக் கண்டுபிடிக்க அத்திசையில் வெக்டார் கூறுகளை மூன்று அச்சுக்களுக்கு இணையாய்ப் பிரிக்க, அவற்றை மிகச்சிறு முழுஎண்களாக்கி அவ்வெண்களைச் சதுர அடைப்புகளுக்குள் இடவேண்டும். படம் 3.5 இல் பல திசைகளில் மில்லர் எண்கள் காண்பிக்கப்பட்டுள்ளன. ஒரு எண்ணின் மீது உள்ள கோடு ஒரு குறிப்பிட்ட அச்சிற்குரிய திசையின்கூறு, எதிர்த்திசையில் உள்ளதைக் குறிக்கிறது.



படம் 3.5 படிகத்தில் திசைகளைக் காட்டும் மில்லர் எண்கள்

3.4 படிக சமச்சீர் கூறுகள் (Crystal symmetry elements)

படிகங்கள், நேர்ப்பெயர்ச்சிச் சமச்சீரை (translational symmetry) உடையனவாகும். இதுமட்டுமன்றிப் படிகங்கள் வேறு வகையான சமச்சீர்களையும் கொண்டுள்ளன. சமச்சீர் அடிப்படையில் பார்த்தால் படிகங்களுக்குப் பொருந்தி வரக்கூடிய மொத்த அணிக்கோவைகள் பதினான்கேயாகும். இவை பிரவே அணிக்கோவைகள் (Bravais lattices) எனப்படும். இப்பதினான்கு பிரவே அணிக்கோவைகளையும் நுணுகிப் பார்த்தால் படிகங்கள் ஏழுவகைப்படும் என்பது தெரியவரும். படிகங்களின் ஏழு வகைகளும், பதினான்கு பிரவே அணிக்கோவைகளும் அட்டவணை 3.1 இல் காட்டப்பட்டுள்ளன. பதினான்கு வகைப் பிரவே அணிக்கோவைகள் படம் 3.6 இல் காட்டப்பட்டுள்ளன.



படம் 3.6 பதினான்கு பிரவே அணிக்கோவைகள்.

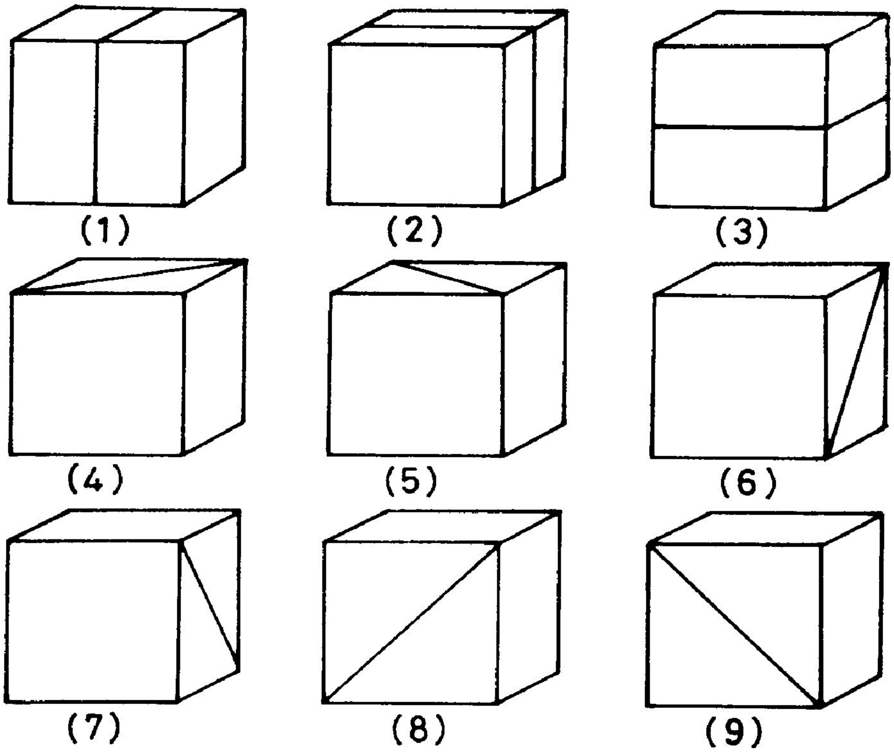
அட்டவணை 3.1

படிக வகைகளும், பிரவே அணிக்கோவைகளும்

	படிக வகை	அணிக்கோவைப் பண்பளவுகளும், அச்சுஇடைக் கோணங்களும்	பிரவே அணிக் கோவை	எடுத்துக்காட்டுகள்
1.	கனசதுரம் (cubic)	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90°$	P	போலோனியம் (Po) (குறிப்பிட்ட வெப்ப நிலை நெடுக்கத்தில் மட்டும்), கால்சியம் புளோரைடு (CaF_2), துத்தநாக சல்பைடு (ZnS),
			I	சோடியம், இரும்பு, தாமிர ஆக்சைடு (Cu_2O)
			F	தங்கம், வெள்ளி, தாமிரம்
2.	நாற்கோணம் (tetragonal)	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90°$	P	டிடேனிய ஆக்சைடு (TiO_2), வெள்ளீய ஆக்சைடு (SnO_2)
			I	பொட்டாசியம் டை ஹைடிரஜன் பாஸ்பேட் (KH_2PO_4)
3.	கனசெவ்வகம் (orthorhombic)	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90°$	P	$C_{15}H_{20}O_2$ போன்ற புரோபர்ஹில் சார்ந்தவை
			C	காரீயகார்பனேட்டு ($PbCO_3$), பேரியம் சல்பேட்டு ($BaSO_4$)
			F	பொட்டாசியம் நைட்ரேட்டு (KNO_3), பொட்டாசியம் சல்பேட்டு (K_2SO_4)
			I	α– கந்தகம்
4.	ஒருசாய்கோணம் (monoclinic)	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90° \neq \beta$	P	நீர்ம கால்சியம் சல்பேட்டு (ஜிப்சம்) ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)
			C	நீர்ம பொட்டாசியம் மக்னீசியம் சல்பேட்டு ($K_2MgSO_4 \cdot 6H_2O$)
5.	மூன்றுசாய் கோணம் (triclinic)	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90°$	P	பொட்டாசியம் டை குரோமேட்டு ($K_2Cr_2O_7$), நீர்ம தாமிர சல்பேட்டு ($CuSO_4 . 5H_2O$)
6.	சாய்சதுரம் (rhombohedral or trigonal)	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90°$ ஆனால் 120° க்கு குறைவாக இருக்கும்	P	கால்சைட் (Calcite), பிஸ்மத், ஆர்சினிக், ஆண்டிமனி
7.	அறுங்கோணம் (hexagonal)	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90°$; $\gamma = 120°$	P	கிராபைட், மக்னீசியம், துத்தநாகம், காட்மியம், குவார்ட்சு.

இனிப்படிகங்களின் சமச்சீர் கூறுகளைப் பார்ப்போம். சமச்சீர்ச் செய்கைகளின் (symmetry operations) உதவியால் படிகங்களின் தன்மைகளை நன்கு அறிந்துகொள்வோம். ஒருசெயலி (operator) ஒருபொருள் அல்லது ஒருபடிவம் (pattern) மீது செயற்படும்போது அதனை ஒரு புதுநிலைக்குக் கொண்டு வரும். அப்புதுநிலையும், பொருளின் தொடக்க நிலையும் வேறுபடுத்திப் பார்க்க முடியாமல் சமமாயிருந்தால் செயலி பொருளின்மீது செய்த செயற்பாட்டிற்குச் **சமச்சீர்ச் செய்கை** எனப்படும். சமச்சீர்ச் செய்கைகள், 1) சமச்சீர் மையம் (centre of symmetry), 2) சமச்சீர்த்தளம் (plane of symmetry), 3) சமச்சீர் அச்சு (axis of symmetry) என மூன்று வகைப்படும்.

இனி எளிய கன சதுரப் படிகத்தின் சமச்சீர் உறுப்புகளைக் கணக்கிடுவோம். கன சதுரப் படிகத்தின் உருவமையம் (body centre) வெவ்வேறு சமச்சீரான இடங்களிலிருந்து (symmetrical positions) சமமான தூரத்தில் இருக்கிறது. இந்த உருவமையம், கனசதுரத்தின் பக்க மையங்களிலிருந்து சமதூரத்தில் உள்ளது. மேலும், கன சதுரத்தின் ஒருமூலையிலிருந்து அதன் எதிர் மூலைக்குக்கோடு ஒன்றனை படிகத்தின் உருவ மையம் வழியாய் வரைந்தால் கோட்டை இணைக்கும் இரண்டு மூலைகளும் படிக உருவ மையத்திலிருந்து சம தூரத்தில் இருக்கும். அதனால், கனசதுரப் படிகத்தின் உருவமையத்தைச் **சமச்சீர் மையம்** (centre of symmetry), என வழங்குகிறோம். ஒவ்வொரு கனசதுரப் படிகமும் ஒருசமச்சீர் மையத்தைப் பெற்றிருக்கிறது.



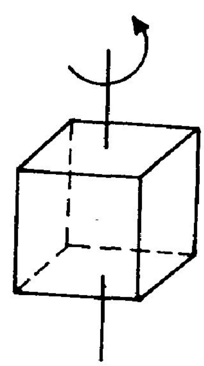
படம் 3.7 கன சதுரத்தின் சமச்சீர்த்தளங்கள்

கனசதுரம் அதன் முகங்களுக்கு இணையாய் படம் 3.7ல் காட்டியுள்ளபடி மூன்று நேர்ச் சமச்சீர்த்தளங்களைப் பெற்றிருக்கிறது (படங்கள் 1, 2, 3). மேலும், அஃது ஆறுமூலைவிட்ட சமச்சீர்த்தளங்களையும் பெற்றிருக்கிறது (படங்கள் 4 முதல் 9 வரை).

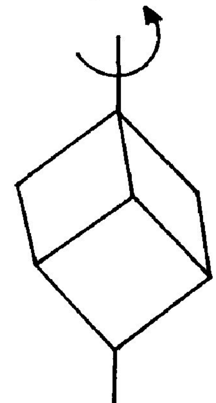
மேலே குறிப்பிட்ட ஒன்பது தளங்களும் படிகத்தை இரண்டு சரிபாதியாய்ப் பிரிப்பதோடு, ஒவ்வொரு பாதியும் அக்குறிப்பிட்ட தளத்தைப் பொறுத்தமட்டில் மற்றப் பாதியின் ஆடிப் பிம்பமாய் (mirror image) அமைகிறது.

கனசதுரத்தின் பக்கங்களில் ஏதேனும் ஒன்றன் மையமாயும் அப்பக்கத்திற்குச் செங்குத்தாயும் உள்ள ஓர் அச்சினைச் சுற்றி 90° சுற்றினால் கன சதுரம் முன்பு இருந்த தோற்றத்தைப் பெறுகிறது. அதனால் கனசதுரத்தை மேற்குறிப்பிட்ட அச்சினைச் சுற்றி, 360° சுற்றினால் நான்குமுறை பழைய தோற்றத்தைப் பெறுகிறது. ஆகையால், இந்த அச்சினை "நான்கு மடிப்புடைய சமச்சீர் அச்சு (axis of four fold symmetry)" அல்லது "**நான்மடக்கு அச்சு** (tetrad axis)" என வழங்குவர். கன் சதுரம் மூன்று நான்மடக்கு அச்சுகளைப் பெற்றிருக்கிறது.

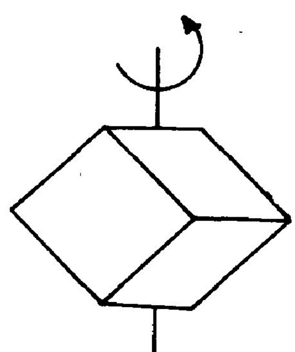
ஒருபடிகத்தைக் குறிப்பிட்ட ஒருசமச்சீர் அச்சினைச் சுற்றி $(\frac{360°}{n})$ சுற்றும்போது அப் படிகம் முன்பு இருந்த நிலையை அல்லது தோற்றத்தை அடையுமானால் அப் படிகம் n-மடிப்புடைய சமச்சீர் அச்சினைப் பெற்றிருக்கிறது எனக்கூறலாம் இதன்படி, n- இன் மதிப்பு ஒன்றானால் தொடக்கத் தோற்றத்தைப் பெறப் படிகத்தின் சமச்சீர் அச்சினைச் சுற்றி 360° சுற்ற வேண்டும். இம்மாதிரியான சமச்சீர் அச்சிற்குச் "**சர்வசம அச்சு** (identity axis) அல்லது "ஒரு **மடக்கு அச்சு**" என்பது பெயர். n- இன் மதிப்பு இரண்டானால் படிகத்தின் சமச்சீர் அச்சினைச் சுற்றி 180° சுற்றவேண்டும். இந்தச் சமச்சீர் அச்சிற்கு "**இருமடக்கு அச்சு** (diad axis)" என்பது பெயர். கன சதுரத்தின் எதிர் ஓரங்களின் மையங்கள் வழியாய்ச் செல்லும் கோட்டை அச்சாய்க்கொண்டு, 180° சுற்றும்போது கனசதுரம் முன்இருந்த நிலையைப் பெறுகிறது. கனசதுரத்திற்கு ஆறு இருமடக்கு அச்சுகள் உள.


$\theta = 90°$

(அ) நான்மடக்கு அச்சு


$\theta = 120°$

(ஆ) மும்மடக்கு அச்சு


$\theta = 180°$

(இ) இரு மடக்கு அச்சு

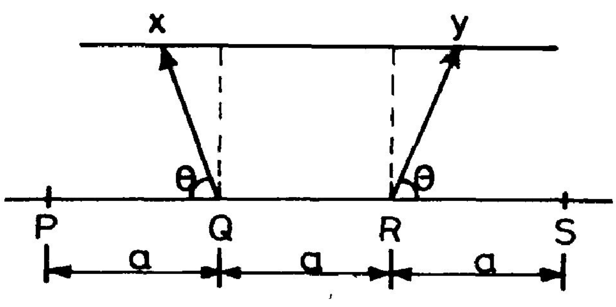
படம் 3.8 கன சதுரத்தின் நான்மடக்கு, மும்மடக்கு, இருமடக்கு அச்சுகள்

n- இன் மதிப்பு மூன்றானால் படிகத்தின் சமச்சீர் அச்சினைச் சுற்றி 120° சுற்ற வேண்டும். இந்த அச்சு "**மும் மடக்கு அச்சு** (triad axis)" எனப்படும். கன சதுரத்தின் உள் மூலைவிட்டத்தை (body diagonal) அச்சாய்க் கொண்டு 120° சுற்றும்போது கன சதுரம் முன்பு இருந்த தோற்றத்தை அடைகிறது. கன சதுரத்திற்கு நான்கு மும் மடக்கு அச்சுகள் உள். இதேபோல் கனசதுரத்திற்கு மூன்று நான் மடக்கு அச்சுகள் உள (படம் 3.8).

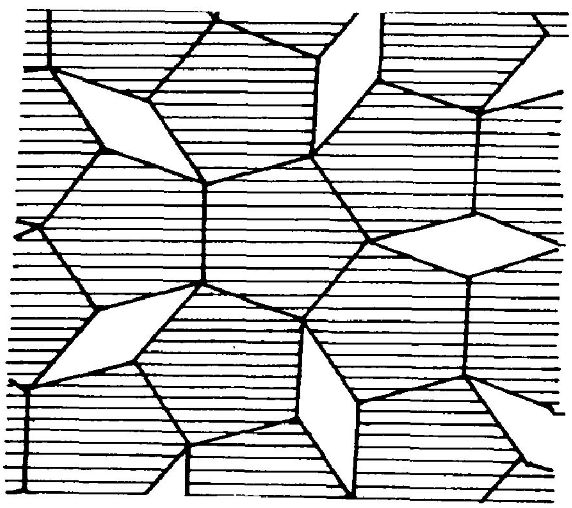
கன சதுரத்தின் சமச்சீர் உறுப்புகளைக் கீழ்வருமாறு வரிசைப்படுத்தலாம்.

(அ)	சமச்சீர் மையம்	1	=	1
(ஆ)	நேர்சமச்சீர் தளங்கள்	3		
(இ)	மூலைவிட்டச் சமச்சீர் தளங்கள்	6	=	9
(ஈ)	இருமடக்கு சமச்சீர் அச்சு	6		
(உ)	மும்மடக்கு சமச்சீர் அச்சு	4		
(ஊ)	நான்மடக்கு சமச்சீர் அச்சு	3	=	13
	மொத்தச் சமச்சீர் உறுப்புகள்			23

n-இன் மதிப்பு ஆறானால் ஒவ்வொரு 60° சுற்றுக்கும் படிகம் தொடக்கத் தோற்றத்தைப் பெறுகிறது. இந்த அச்சிற்கு **அறுமடக்கு அச்சு** (hexad axis) என்பது பெயர். மேலே கூறியவற்றிலிருந்து படிகத்தின் ஒரு சுழற்சி அச்சு (rotation axis) ஒருமடக்கு, இருமடக்கு, மும்மடக்கு, நான்மடக்கு, அறுமடக்கு என இருக்கலாம் எனத் தெரிகிறது. இது அச்சினைச் சுற்றியுள்ள வெளியினது சமச்சீரையே முற்றிலும் பொறுத்தது. n- க்கு மேற்கண்ட மதிப்புகளைத் தவிர மற்ற மதிப்புகள் இருக்கமுடியாது. இது பற்றி இங்குக் காண்போம்.



(அ)



(ஆ)

படம் 3.9 அணிக்கோவைக்கு ஐந்து மடக்கு அச்சு இராதென்பதை விளக்கும் படங்கள்.

படம் 3.9 (அ) வில் காட்டியுள்ளது போன்ற PQRS என்ற அணிக்கோவை வரிசையொன்றனை எடுத்துக்கொள்வோம். அணிக்கோவை மாறிலி (lattice constant) 'a' எனவும், இந்த அணிக்கோவை n-மடக்கு அச்சினைப் பெற்றுள்ளதாகவும் கொள்வோம். QP, RS ஆகிய வெக்டார்களைப் படத்தில் காட்டியுள்ளது போல் $\theta = \frac{360°}{n}$ கோணம் சுழற்றுவோம். சுழற்சிக்குப் பின்பு இரு வெக்டார்களின் முனைகளும் x, y ஆகிய இடங்களில் இருக்கின்றன எனக் கொள்வோம். நாம் எடுத்துக்கொண்டுள்ள அணிக்கோவைக்கு n- மடக்கு அச்சுள்ளதால் x, y ஆகிய இருபுள்ளிகளும் அணிக்கோவைப் புள்ளிகளாய் இருக்கவேண்டும். மேலும், xy என்ற கோடு PQRS என்ற கோட்டிற்கு இணையாய் இருக்கவேண்டுமென்பது தெளிவு. அதனால் xy தூரமானது அணிக்கோவை மாறிலியின் முழு எண் மடங்குகளாய்த்தான் இருக்க வேண்டும். அதாவது,

$$xy = a + 2a\cos\theta = ma \tag{3.1}$$

இங்கே m ஆனது $0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$ ...... போன்ற மதிப்புகளைப் பெறக்கூடும்.

சமன்பாடு (3.1) விருந்து

$$\cos\theta = \frac{m-1}{2} = N/2 \tag{3.2}$$

எனப்பெறலாம். இதில் N என்பதும் ஒரு முழு எண்; சமன்பாடு 3.2 ஐத் தீர்த்தால் θ பெறக் கூடிய மதிப்புகளும், அதனால் படிக அணிக்கோவை பெறுக்கூடிய மடக்குகளும் தெரியும். இவை அட்டவணை 3.2 இல் தரப்பட்டுள்ளன.

அட்டவணை 3.2

அணிக்கோவைக்குரிய சுழற்சி அச்சுகள்

N	cosθ	θ	n = 360°/θ
−2	−1	180°	2
−1	$-\frac{1}{2}$	120°	3
0	0	90°	4
1	$\frac{1}{2}$	60°	6
2	1	360° அல்லது 0°	1

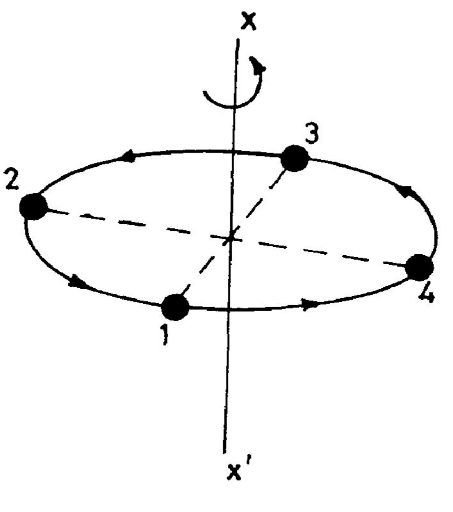
சமன்பாடு 3.2 இல் N- இன் மதிப்பு ± 2 க்குமேல் இருக்கமுடியாது. ஏனெனில், cosθ வின் மதிப்பு −1 விருந்து +1 வரைதான் இருக்கமுடியும், அதனால், ஒருபடிக அணிக்கோவைக்கு ஒருமடக்கு, இருமடக்கு, மும்மடக்கு, நான்மடக்கு, அறுமடக்கு சுழற்சி அச்சுகள்தான் இருக்கமுடியும். ஒருபடிக அணிக்கோவையின் சமச்சீர்ச் செய்கையின்போது

படிகத்தில் காலியிடங்கள் இல்லாமல் நிரப்பப்படவேண்டும். மேலும் சமச்சீர்ச் செய்கை முடிந்த பின்பும் படிகம் நேர்பெயர்ச்சிச் சமச்சீரைப் பெற்றிருக்கவேண்டும். இவ்விரு நிபந்தனைகளும் ஐந்து மடக்குச் சமச்சீர் அச்சில் ஒத்துவராது. ஐங்கோணங்களால் (pentagons) படிகவெளியை நிரப்பிக் கொண்டுவந்தால் காலியிடங்கள் தோன்றும் (படம் 3.9 (ஆ)). காலியிடம் இல்லாமல் ஐங்கோணங்களால் படிகவெளியை நிரப்பமுடியாது. இதனை மாணவர் செய்முறையினால் நிரூபிக்கலாம்.

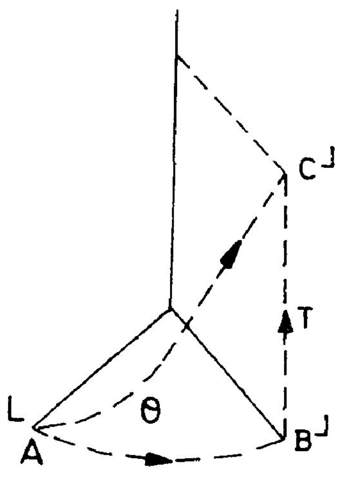
மேற்கண்ட சமச்சீர் உறுப்புகளைத் தவிர வேறு சில சமச்சீர் உறுப்புகளும் உள்ளன. இவற்றில் முக்கியமானவை சுழல்தலைகீழாக்க அச்சு, திருகு அச்சு, நழுவு தளம் ஆகும்.

சுழல் தலைகீழாக்க அச்சு (Rotoinversion axis)

சுழல் தலைகீழாக்க அச்சுச் சமச்சீர்ச் செய்கை, சுழற்சியும், தலைகீழாக்கமும் சேர்ந்த ஒருகலப்பினச் செயற்படாகும். ஒருபடிகத்தின் ஓர் அச்சினைச்சுற்றி ஒருசுழற்சியும் அதனுடன் தலைகீழாக்கமும் நடந்தபின் அப் படிகம் தொடக்க நிலையிலிருந்த தோற்றத்தையே கொண்டிருந்தால் அந்த அச்சினைச் சுழல் தலைகீழாக்க அச்சு என்பர். படிகங்கள் ஒன்று, இரண்டு, மூன்று, நான்கு, ஆறு மடிப்புடைய சுழல்தலைகீழாக்க அச்சுக்களைக் கொண்டிருக்கலாம். இதனை விளக்குவதற்காகப் படம் 3.10இல் காட்டியவாறு ஒருபடிகத்தை அதன் மையவழியே செல்லும் அச்சினைக்கொண்டு குறிப்பிட்ட கோணத்தில் சுற்றி, அதனுடன் தலைகீழாக்கமும் நடைபெறுகிறது என வைத்துக் கொள்வோம். இதன்படி XX′ என்ற அச்சு, (1) என்று குறிப்பிட்ட புள்ளியில் செயற்பட்டு அப் புள்ளியை 90° இடம்புரியாகச் (anticlockwise) சுற்றி, அதனைத் தலைகீழாக்கம் மூலம் (2) என்று இடப்பட்டிருக்கும் புள்ளிக்கு மாற்றுகிறது. இக் கலப்புச் செய்கையை மறுபடியும் இப்புள்ளிமீது திரும்பச் செய்ய இப்போது இப்புள்ளி (3) என்று இடப்பட்டிருக்கும் புள்ளியை அடையும். அங்கே மேலும் இக்கலப்புச் செய்கையை நடத்த



படம் 3.10 சுழல் தலைகீழாக்க அச்சு



படம் 3.11 திருகு அச்சு

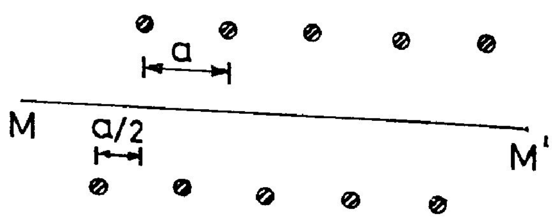
அப்புள்ளி (3) என்று குறிப்பிட்ட இடத்திலிருந்து (4) என்று குறிப்பிட்ட இடத்தை அடையும். மேலும், ஒருதடவை இக்கலப்புச் செய்கையை திரும்ப நடத்த அப்புள்ளி தான்தொடக்க நிலையிலிருந்த இடமான (1) ஐ அடையும். அதனால், நான்கு முறை இக்கலப்புச் செய்கை ஒரு புள்ளிமீது செயல்பட, அப்புள்ளி தொடக்க நிலையை அடைகிறது. அதனால், மேற்கண்ட உதாரணத்தை நான்கு மடிப்புடைய சுழல் தலைகீழாக்க அச்சாக எடுத்துக்கொள்ளலாம். இச்சமச்சீர் கூறான சுழல் தலைகீழாக்க அச்சு ஒரு சுழற்சியும் ஒருதலைகீழாக்கமும் சேர்ந்த ஒருகலப்புச் செயற்பாடாக (hybrid operation) உள்ளதால் இதனை நேரிய சுழற்சி அச்சாகவோ (proper rotation axis) அல்லது ஒரு தலைகீழாக்க மையமாகவோ (inversion centre) கருதமுடியாது

திருகு அச்சு (Screw axis)

சென்ற பகுதியில் நேரிய சுழற்சியையும் தலைகீழாக்கத்தையும் கலக்கும்போது சுழல் தலைகீழாக்க அச்சு கிடைப்பதுபோல் ஒரு நேரிய சுழற்சியினை அச்சுழற்சி அச்சிற்கு இணையான திசையில் ஏற்படுத்தும் நேர்பெயர்ச்சியோடு (translation) இணைக்கவும் முடியும். இத்தகைய செயற்பாடு படம் 3.11 இல் காட்டப்பெற்றுள்ளது. இங்கே A யிலிருந்து B க்கு θ கோணம் சுழற்றப்பட்ட பின்னர் B யிலிருந்து C க்கு அச்சிற்கு இணையான திசையில் T அளவு இடப்பெயர்ச்சி அளிக்கப்படுகிறது. இந்த இருசெயல்களையும் இணைத்துப்பார்த்தால் அது A யிலிருந்து C க்கு ஒருதிருகு சுழற்சி இயக்கத்திற்குச் சமமானதென்பதைப் புரிந்து கொள்ளலாம். இத்தகைய இயக்கத்தோடு சம்பந்தப்பட்ட சமச்சீர்க்கூறு, திருகு அச்சு எனப்படும்.

நழுவு தளம் (Glide plane)

ஒரு திருப்பத்தை (reflection) ஆடித்தளத்திற்கு இணையான திசையில் ஒருநேர்ப் பெயர்ச்சியோடு இணைத்து ஒருசமச்சீர் செயற்பாட்டினை உருவாக்கலாம். இது நழுவுத் திருப்பம் (glide reflection) எனப்படும். இதனால் உண்டாகும் அமைப்போடு தொடர்புகொண்ட சமச்சீர்க்கூறு நழுவு தளம் எனப்படும். படம் 3.12 ல் நழுவு தளத்தில் செயற்பாடு காட்டப்பெற்றுள்ளது. மேல் அடுக்கிலுள்ள அணுக்கள் a/2 தொலைவு நேர்பெயர்ச்சி செய்யப்பட்டுப் பின் MM′ என்ற தளத்தில் திருப்பம் அடைந்தால் அணுக்களால் ஆகிய கீழ்த்தளம் தோன்றுகிறது.



படம் 3.12 நழுவு தளம்

படிகங்களின் சமச்சீர்க் கூறுகள் அனைத்தும் (தனித்தனியான சமச்சீர்க் கூறுகளாகவோ, இரண்டு மூன்று சமச்சீர் கூறுகள் சேர்ந்த கலப்புச் சமச்சீர் கூறுகளாகவோ) 32 வகைக்குள் அடங்கும். அவை படிகத்தின் 32 சமச்சீர் வகைகள் என வழங்கப்படுகின்றன.

போலி சமச்சீர் (Pseudo symmetry)

படிகம் வளர்க்கும்போது ஒருபடிகத்தினூடே இரண்டு மூன்று படிகங்கள் சேர்ந்து இடை வளர்ச்சி (inter-growth)யில் வளரும். ஒருபடிகத்தின்மீது அதே பொருளின் இன்னொரு படிகம் அமைந்து இரட்டைப் படிகங்களாக(twins)க் காணப்படுதலும் உண்டு. இம் மாதிரியான இரட்டைப் படிகங்களின் சமச்சீர் கூறுகள் தனிப்படிகத்தின் சமச்சீர் கூறுகளைக்காட்டிலும் குறைவாகவோ மிகுதியாகவோ இருக்கும். இது "***போலி சமச்சீர்***" எனப்படும். உதாரணமாய்க் கனசதுரத்தின் இரட்டைப் படிகங்கள் ஆறுமடிப்புடைய சமச்சீர் அச்சுக்களைப் பெறலாம். ஆனால், கன சதுரத்தின் தனிப் படிகத்திற்கு (single crystal) ஆறுமடிப்புடைய சமச்சீர் அச்சுக்கள் இல்லை. மைக்கா எனப்படும் அபிரக(mica)த் தாதுப்பொருள் சாதாரணமாய்ப் போலி சமச்சீர் உடையதாயிருக்கும்.

3.5 *சில எளிய படிக இயலமைப்புகள்*

படிகங்கள் பதினான்கு வகையான அணிக்கோவைகளில் அமையும் என்றாலும் நடைமுறையில் பொறியியற் துறையில் முக்கியத்துவம் வாய்ந்த **திண்மங்களில்** பெரும்பான்மையானவை எளிய கனசதுரம் (Simple Cube – SC), உருவமையக் கனசதுரம் (Body Centred Cube-BCC), முகமையக் கனசதுரம் (Face Centred Cube – FCC), அறுங்கோண நெருக்கப்பொதிவு (Hexagonal Close Packing – HCP) போன்ற இயலமைப்புகளிலேயே படிகங்களாகின்றன. அவை குறித்து விரிவாய் இங்குக் காண்போம்.

முதலில் படிக இயலமைப்பை விளக்கப் பயன்படும் சில அடிப்படை வரையறைகளைக் காண்போம்.

அணு ஆரம் (atomic radius) : ஒருபடிகத்தில் இருக்கும் அணுவினுடைய விட்டத்தின் பாதியே அணு ஆரம் 'r' என்றழைக்கப்படுகிறது. அதாவது, ஒரு படிகத்தின் அணிக்கோவையில் அடுத்தடுத்து இருக்கும் இரு அணுக்களுக்கு இடையே உள்ள தூரத்தின் பாதியே அணுஆரம் ஆகும். இதனை அலகுசெல் மாறிலியிலும் வரையறுக்கலாம்.

ஆய எண் (Co–ordination number): படிகத்தின் அலகு செல்லில் (Unit cell) உள்ள ஓர் அணுவைச்சுற்றி, மிக அண்மையிலும், சமமான '2r' தொலைவிலும் உள்ள அண்டை அணுக்களின் எண்ணிக்கை அப்படிகத்தின் 'ஆய எண்' எனப்படும். இங்கு '2r' என்பது மிக அண்மையிலுள்ள அணுக்களின் ***அண்டை தூரம்*** (nearest neighbouring distance) ஆகும்.

பொதிவு அடர்த்தி (density of packing) : அலகு செல்லில் உள்ள அணுக்களின் மொத்த கன அளவிற்கும் அலகு செல்லின் கன அளவிற்கும் உள்ள விகிதமே பொதிவு அடர்த்தி அல்லது பொதிவுக்காரணி (packing factor) எனப்படும்.

அஃதாவது,

$$\text{பொதிவு அடர்த்தி (பொ.அ.)} = \frac{\text{அலகு செல்லிலுள்ள அணுக்களின் மொத்த கன அளவு}}{\text{அலகு செல்லின் கன அளவு}}$$

$$\therefore \text{பொ.அ} = \frac{v}{V}$$

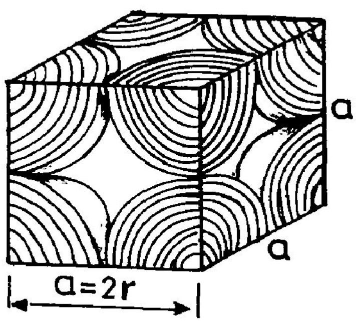
இங்கு v = அலகு செல்லிலுள்ள அணுக்களின் மொத்த கன அளவு ;

V = அலகு செல்லின் கன அளவு

பொதிவு அடர்த்திமூலம் அணிக்கோவையில் அணுக்கள் எவ்வாறு நெருக்கமாய் அமைந்துள்ளன என்பதைத் தெரிந்து கொள்ளலாம். அதிகமதிப்புள்ள பொதிவு அடர்த்தி, அணுக்கள் நெருக்கமாயமைந்துள்ளதையும், குறைந்த மதிப்புள்ள பொதிவு அடர்த்தி நெருக்கமின்மையும் காட்டுகின்றன.

(அ) எளிய கன சதுரம்

எளிய கனசதுரத்தின் அலகு செல்லில் அணுக்கள், செல்லின் மூலைகளில் மட்டுமே உள்ளன. அவை கனசதுரத்தின் விளிம்புகளினூடே ஒன்றனையொன்று தொட்டுக் கொண்டிருக்கின்றன. ஒவ்வொரு அணுவைச் சுற்றிலும் ஆறு அண்டை அணுக்கள் உள்ளன. ஆகையால் இதன் ஆய எண் ஆறாகும்.



படம் 3.13 எளிய கனசதுரத்தின் அலகு செல்

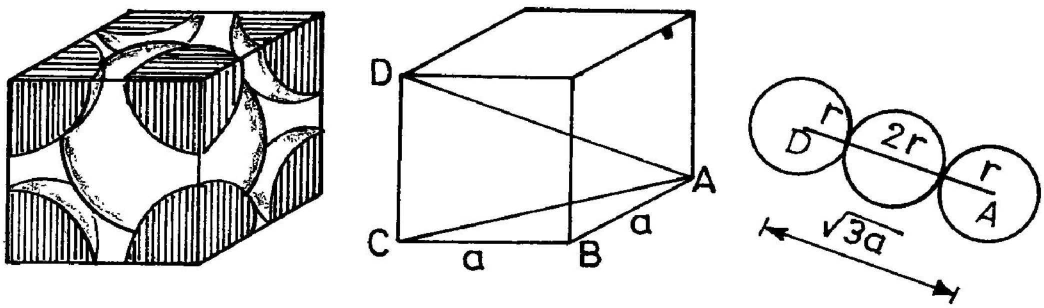
படம் 3.13 இல் காட்டியுள்ள எளிய கனசதுரத்தின் அலகு செல்லின் ஒவ்வொரு மூலையிலும் உள்ள ஓர் அணுவை அண்டையிலுள்ள 8 அலகுசெல்களும் பகிர்ந்து கொள்கின்றன. இங்ஙனமாய் கனசதுரத்தின் ஒவ்வொரு மூலையிலிருந்தும் அலகு செல்லுக்கு கிடைக்கும் அணுவின் பங்கு $\frac{1}{8}$ ஆகும். எனவே ஓர் எளிய கனசதுர அலகு செல்லிலுள்ள

மொத்த அணுக்களின் எண்ணிக்கை = 8 மூலைகள் $\times \frac{1}{8}$ அணு = 1 அணு ஆகும். அதனால், இந்த அலகுசெல்லை 'மூல அலகு செல்' எனவும் கூறலாம். அணு ஆரம் 'r' எனவும், கனசதுரத்தின் பக்கம் 'a' எனவும் கொண்டால், இதில் a = 2r.

$$\text{பொதிவு அடர்த்தி} = \frac{v}{V} = \frac{1 \times \frac{4}{3}\pi r^3}{a^3} = \frac{4\pi\left(\frac{a}{2}\right)^3}{3a^3} = \frac{\pi}{6} \ (\text{அல்லது})\ 0.5235$$

எனவே, பொதிவு அடர்த்தி 52%. பொலோனியம் (Polonium) என்னும் தனிமம் இப்படிக இயலமைப்பினைக் குறிப்பிட்ட வெப்பநிலைநெடுக்கத்தில் பெற்றிருக்கிறது. மேலும் கால்சியம் குளோரைடு, அம்மோனியம் குளோரைடு போன்ற சேர்மங்களும் இப்படிக இயலமைப்பினைப் பெற்றிருக்கின்றன.

(ஆ) உருவமைய கனசதுர இயலமைப்பு



(அ) (ஆ) (இ)

படம் 3.14 உருவமையக் கனசதுரத்தின் இயலமைப்பு

படம் 3.14 (அ) வில் காணும் உருவமையக் கனசதுர இயலமைப்புடைய இரும்பினை எடுத்துக்கொள்வோம்; அறைவெப்ப நிலையில் இரும்பின் அலகுசெல்லில் ஓர் அணு கன சதுரத்தின் உருவமையத்திலும், எட்டு அணுக்கள் கனசதுரத்தின் மூலைகளிலும் அமைந்துள்ளன. இவ்வித இயலமைப்பில் ஒவ்வோர் அணுவும், அதனைச் சுற்றி, எட்டு அண்டை அணுக்களைப் பெற்றிருக்கிறது. ஆகையால் உருவமைய இயலமைப்புப் படிகத்தின் ஆய எண் எட்டாகும். மேலும், இதன் அலகுசெல் ஒவ்வொன்றும் மொத்தத்தில் இரண்டு அணுக்களைப் பெற்றிருக்கிறது. அஃதாவது, கனசதுர வடிவமைப்புடைய அலகுசெல்லின் உருவமையத்தில் ஓர் அணுவும் அதன் மூலைகளில் உள்ள அணுக்கள் எல்லாம் சேர்ந்து மொத்தத்தில் ஓர்அணுவும் ஆக இரண்டு அணுக்களைப் பெற்றிருக்கிறது. அதனால், இவ்வகை அலகு செல்லை 'மூலஅலகுசெல்' எனக் கூற முடியாது. இனிப் பொதிவு அடர்த்தியைக் கணக்கிடுவோம். படம் 3.14 (ஆ) வில் உள்ள முக்கோணம் ABC யில்

$$AC^2 = AB^2 + BC^2 = a^2 + a^2 = 2a^2$$

முக்கோணம் ACD யில்

$$AD^2 = AC^2 + CD^2$$
$$= 2\,a^2 + a^2 = 3\,a^2$$
$$\therefore\ AD = \sqrt{3}\,a$$

'r' என்பது அணு ஆரம் என்றால்,

AD = 4r (படம் 3.14 (இ) யில் தெளிவாகக காட்டப்பட்டுள்ளது)

எனவே, $4\,r = \sqrt{3}\,a$ அல்லது $r = \sqrt{3}/4\,a$

$$\therefore\ \text{பொதிவு அடர்த்தி} = \frac{v}{V} = \frac{2 \times \frac{4}{3}\pi r^3}{a^3} = \frac{8}{3}\frac{\pi r^3}{a^3}$$

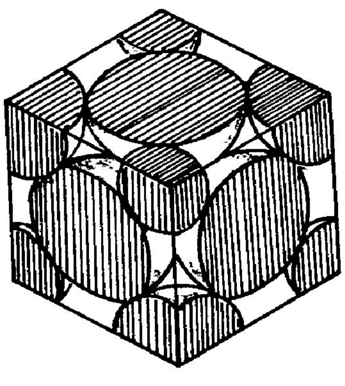
'r' இன் மதிப்பினை இச் சமன்பாட்டில் இட,

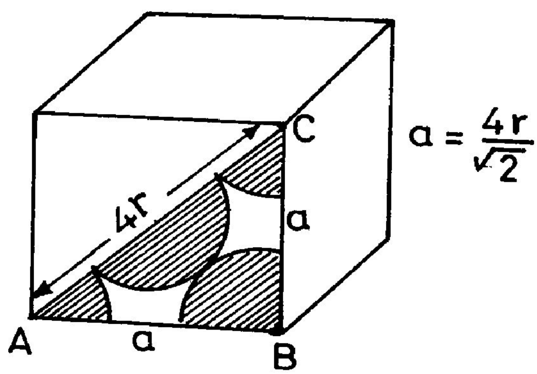
$$\text{பொதிவு அடர்த்தி} = \frac{8}{3}\pi\frac{3\sqrt{3}\,a^3}{4^3\,a^3} = \frac{\sqrt{3}}{8}\pi = 0.68$$

அஃதாவது, பொதிவு அடர்த்தி 68% ஆகும்.

பேரியம், சீசியம், குரோமியம், இரும்பு, நியோபியம், பொட்டாசியம், சோடியம், டங்ஸ்டன் போன்ற தனிமங்கள் உருவமையக் கனசதுர இயலமைப்புடைய தனிமங்களாகும். இவற்றில் இரும்பிற்கு ஒரு சிறப்புத் தன்மை உண்டு. அஃதாவது, உயர் வெப்பநிலைகளில் அது உருவமைய கனசதுர இயலமைப்பிலிருந்து முகமையக் கனசதுர இயலமைப்பிற்கு மாறும். அச்சமயத்தில் அதன் அடர்த்தி கூடும்.

(இ) முகமையக் கனசதுர இயலமைப்பு





படம் 3.15 முகமையக் கனசதுரத்தின் இயலமைப்பு

தாமிரம் என்னும் உலோகம் முகமையக் கன சதுர இயலமைப்பினைப் பெற்றிருக்கிறது. தாமிர அலகு செல்லின் ஒவ்வொரு மூலைகளிலும் அணுக்கள் அமைந்திருப்பதோடு அதன் ஒவ்வொரு முகத்தின் மையத்திலும் அணுக்கள் இருக்கின்றன (படம் 3.15). அதனால், ஒவ்வொரு அலகுசெல்லிலும் ஆறுமுகமைய அணுக்களும், எட்டுமூலை அணுக்களும் உள்ளன. ஒவ்வொரு முகமைய அணுவும் அடுத்தடுத்துள்ள இரு அலகுசெல்களால் பகிர்ந்து கொள்ளப்படுகிறது. ஓர் அலகுசெல்லிற்கு முகமைய அணுக்கள் மூலம் வரும் அணுக்களின் எண்ணிக்கை மூன்றாகும். அதேபோல் எட்டு மூலைகளில் உள்ள அணுக்கள் எல்லாம் சேர்ந்து ஓர் அணுவையும் தருகிறது. அதனால், முகமையக் கனசதுர இயலமைப்பின் அலகுசெல்லில் உள்ள அணுக்களின் மொத்த எண்ணிக்கை நான்காகும்; மேலும், இந்த இயலமைப்பில் ஒவ்வோர் அணுவும் தன்னைச்சுற்றி அண்டை அணுக்களாகச் சம தொலைவில் 12 அணுக்களைப் பெற்றிருக்கிறது. அதனால் இதன் ஆய எண் பன்னிரெண்டாகும்.

படத்தில் காட்டியுள்ளவாறு முக்கோணம் ABC யில்

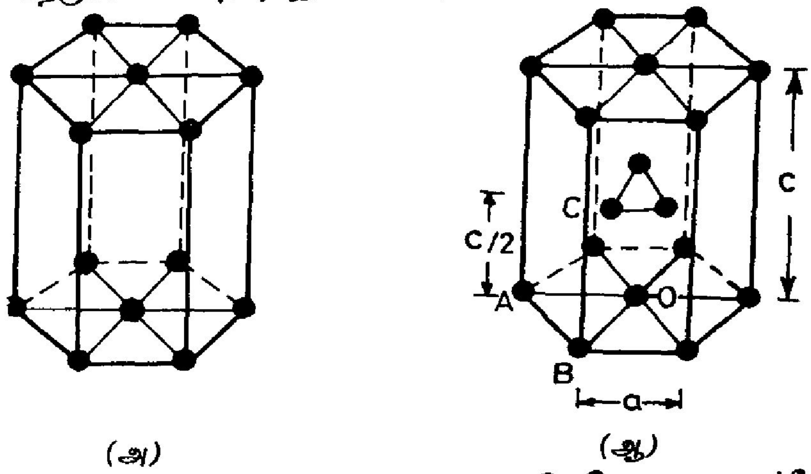
$$AC^2 = AB^2 + BC^2 = a^2 + a^2 = 2a^2. \quad \text{ஆனால்,} \quad AC = 4\,r$$

$$\therefore \; (4r)^2 = 2\,a^2 \quad \text{அல்லது} \quad a = \sqrt{8}\,r$$

$$\text{எனவே பொதிவு அடர்த்தி} = \frac{v}{V} = \frac{4 \times \frac{4}{3}\pi r^3}{a^3} = \frac{16}{3}\pi r^3 \cdot \frac{1}{8\sqrt{8}\,r^3} = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} = 0.74$$

அஃதாவது, பொதிவு அடர்த்தி 74% ஆகும். மற்றைய கன சதுர இயலமைப்புகளை விட இதில் பொதிவு அடர்த்தி மிகுதியாயுள்ளது. அதனால், மிகுதியான உலோகங்கள், இந்த இயலமைப்பினைப் பெற்றிருக்கின்றன. உதாரணமாய்த் தாமிரம், அலுமினியம், காரீயம், வெள்ளி, தங்கம் போன்ற உலோகப் படிகங்கள் இந்த இயலமைப்பினைப் பெற்றிருக்கின்றன.

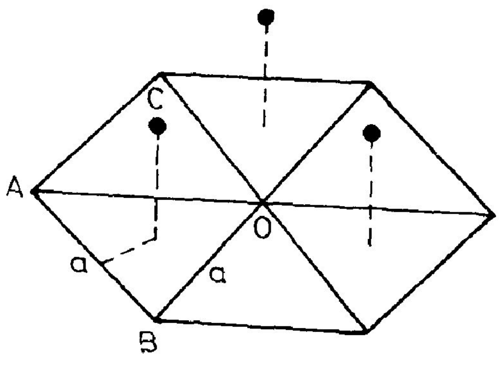
(ஈ) அறுங்கோண நெருக்கப் பொதிவு இயலமைப்பு

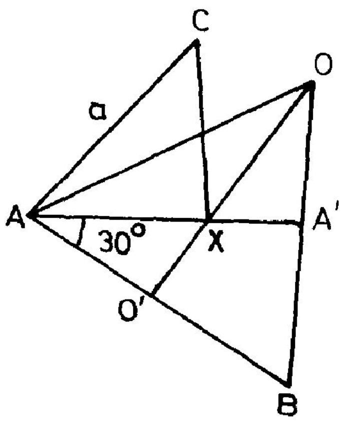


படம் 3.16 (அ) எளிய அறுங்கோணம் (ஆ) நெருக்கப் பொதிவுடைய அறுங்கோணம்

பெரும்பாலும் உலோகப்படிகங்கள் நெருக்கப் பொதிவுடைய இயலமைப்புகளில் இருக்கின்றன. ஒவ்வோர் அணுவிலும் ஒன்று அல்லது அதற்கு மேற்பட்ட எலெக்ட்ரான்கள் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களாய் வெளியேறியவுடன் அணிக்கோவைப் புள்ளிகளில் உள்ள அயனிகள் நெருக்கப் பொதிவைப் பெற்று மிக்க ஆற்றல் வாய்ந்த அணு இடைப்பிணைப்பால் பிணைக்கப்படுவதால் உலோகப்படிகங்கள் அதிக அடர்த்தி மிக்க பொருள்களாய் விளங்குகின்றன. ஒரேவகையான அணுக்களைப் பெற்ற உலோகப் படிகங்கள், பெரும்பாலும் இருவித இயலமைப்பில் இருக்கின்றன. அவை முறையே முகமையக் கன சதுர இயலமைப்பு, நெருக்கபொதிவுடைய அறுங்கோண இயலமைப்புகளாகும். முகமையக் கன சதுர இயலமைப்புபற்றிச் சென்ற பகுதியில் பார்த்தோம். படம் 3.16 (அ) வில் சாதாரண அறுங்கோண இயலமைப்பிற்குரிய ஓர் அலகு செல் காட்டப்பட்டுள்ளது. இதன் கன அளவு மிகுதியாய் இருந்தாலும் இந்த அலகு செல் மூன்று அணுக்களைமட்டும் பெற்றிருக்கிறது. இதன் பொதிவு அடர்த்தியும் மிகக் குறைவு. அதனால் உலோகங்கள் சாதாரண அறுங்கோண இயலமைப்பில் படிகமாவதில்லை; உலோகங்கள் படம் 3.16 (ஆ) வில் காட்டியவாறு நெருக்கமான பொதிவுடைய அறுங்கோண இயலமைப்பினைப் பெற்றிருக்கின்றன. உதாரணத்திற்கு மக்னீசியத்தை எடுத்துக் கொள்ளலாம். படத்தில் நெருக்கப் பொதிவுடைய அறுங் கோண இயலமைப்பின் அலகு செல் காட்டப்பட்டுள்ளது. படத்தின் அடித்தளத்தின் மையத்திலுள்ள அணு அதே தளத்தில் ஆறு அண்மை அணுக்களைப் பெற்றுள்ளது. மேலும், இத்தளத்திற்கு $\frac{c}{2}$ தூரத்திலுள்ள மேல் தளத்தில் மூன்று அணுக்களையும், $\frac{c}{2}$ தூரத்தில் உள்ள கீழ்த்தளத்தில் மூன்று அணுக்களையும் அண்டை அணுக்களாய்ப் பெற்றுள்ளது. அதனால், மொத்த அண்டை அணுக்களின் எண்ணிக்கை அல்லது ஆய எண் பன்னிரண்டு ஆகும். அண்டை அணுக்களிடைத்தூரத்தையும் படத்திலிருந்து தெரிந்து கொள்ளலாம். இது 'a' க்குச்சமம். அதனால், அணுவின் விட்டமும் $2r = a$ ஆக இருக்கவேண்டும்.

நெருக்கப் பொதிவுடைய அறுங்கோண இயலமைப்புடைய படிகங்களின் c/a விகிதம்





படம் 3.17 நெருக்கப் பொதிவுடைய அறுங்கோணத்தின் c/a விகிதம் கணக்கிடல்

படத்தில் காட்டப்பட்டுள்ள ABO என்ற முக்கோணத்தை எடுத்துக்கொள்வோம். இதில் A, B, O ஆகியவை அணிக்கோவைப்புள்ளிகள். இத்தளத்தில் செங்குத்தாய் மேலே c/2 தொலைவில் 'C' என்ற இடத்தில் ஓர் அணு உள்ளது. முக்கோணம் ABA′ யில்

$$\cos 30° = \frac{AA'}{AB}$$

$$\therefore AA' = AB \cos 30° = a\sqrt{3}/2$$

ஆனால், $AX = \frac{2}{3} AA' = \frac{2}{3} . a\frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{a}{\sqrt{3}}$

முக்கோணம் AXC யில்

$$AC^2 = AX^2 + CX^2$$

$$\therefore CX^2 = AC^2 - AX^2 = a^2 - \frac{a^2}{3} = \frac{2}{3} a^2$$

ஆனால் $CX = \frac{c}{2}$

$$\therefore \left(\frac{c}{2}\right)^2 = \frac{2}{3} a^2$$

அல்லது $\frac{c}{a} = \sqrt{\frac{8}{3}} = 1.633$

நெருக்கப் பொதிவுடைய அறுங்கோண இயலமைப்பு அலகுசெல்லின் கன அளவும், பொதிவு அடர்த்தியும்

அறுங்கோண அடித்தளப் பரப்பு $= 6 \times$ முக்கோணம் ABO வின் பரப்பு

$$= 6 \times \frac{1}{2} \times AB \times OO'$$

$$= 3 \times a \times \sqrt{3}/2a$$

$$= 3\sqrt{3}\, a^2/2$$

எனவே அறுங்கோண அலகுசெல்லின் கனஅளவு 'V' $= 3\sqrt{3}\, a^2 c/2$. இனி, அதன் அலகுசெல்லிலுள்ள மொத்த அணுக்களைக் கணக்கிடுவோம். நெருக்கப் பொதிவுடைய அறுங்கோணத்தில் மூன்று அடுக்குகள் உள்ளன. மேல் அடுக்கிலும் கீழ்அடுக்கிலும் ஏழு அணுக்கள் வீதம் உள்ளன. மேல் அடுக்கை எடுத்துக்கொண்டால் ஒவ்வொரு மூலைஅணுவும் 1/6 அணுவை அலகு செல்லிற்குக் கொடுக்கிறது; மேல் அடுக்கின் நடு அணு 1/2 அணுவை அலகு செல்லிற்குக் கொடுக்கிறது. அதனால், மேல் அடுக்கின்மூலம் அலகு செல்லுக்குக் கிடைக்கும் மொத்த அணுக்கள் $\left(\frac{1}{6} \times 6\right) + \frac{1}{2} = 3/2$ ஆகும். கீழ்அடுக்கு மூலமும் $\frac{3}{2}$ அணுக்கள் கிடைக்கும். நடுஅடுக்கின் மூலம் அலகு செல்லிற்குக் கிடைக்கும்

அணுக்கள் மூன்று ஆகும். அதனால், அலகு செல்லில் உள்ள மொத்த அணுக்கள் மூன்று ஆகும். அதனால், அலகு செல்லில் உள்ள மொத்த அணுக்கள் $3/2 + 3/2 + 3 = 6$ ஆகும்.

$$\text{பொதிவு அடர்த்தி} = \frac{v}{V}$$

$$= \frac{6 \times \frac{4}{3}\pi r^3}{\frac{3\sqrt{3}\, a^2 c}{2}} = \frac{16\pi r^3}{3\sqrt{3}\, a^2 c}$$

இதில் $2r = a$, $c = \sqrt{8/3}\ a$ என இட,

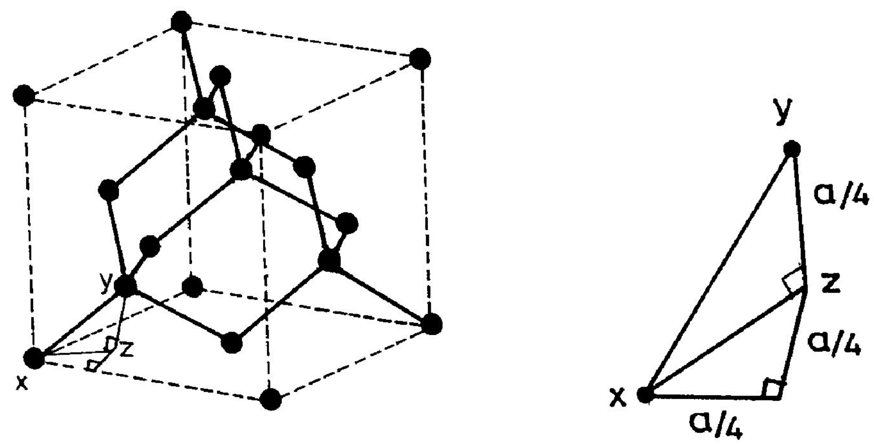
$$\text{பொதிவு அடர்த்தி} = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} = 0.74 = 74\,\%$$

3.6 இதர சில முக்கிய படிகவகைகள்

பெரும்பாலான தனிமங்கள் மேற்சொன்ன இயலமைப்புகளில் ஏதேனும் ஒன்றன் வடிவத்தைப் பெற்றுப் படிகமாகின்றன. ஆனால், சில தனிமங்களோ, சேர்மங்களோ மேற்சொன்ன இயலமைப்புகளைத்தவிர வேறு சில புதிய இயலமைப்புகளைப் பெற்றிருக்கின்றன. இப்புதிய இயலமைப்புகள் மேற்சொன்ன இயலமைப்புகளைச் சார்ந்தனவாகவோ, இரண்டு மூன்று இயலமைப்புகளின் சேர்க்கையாகவோ இருக்கும்.

(அ) வைரத்தின் இயலமைப்பு

வைரத்தின் இயலமைப்பு இரண்டு முகமையக் கனசதுரத் துணைஅணிகோவைகள் ஒன்றிற்குள் மற்றொன்று உட்புகுந்து அமைந்ததொன்றாய்க் காணப்படுகிறது. இந்த இயலமைப்பின் அலகுசெல் படம் 3.18 இல் காட்டப்பட்டுள்ளது.



படம் 3.18 வைரத்தின் அலகு செல்

இதில் ஒருதுணைஅணிக்கோவை, அதனுடைய தோற்றுவாயை (0, 0, 0) என்னும் புள்ளியில் பெற்றிருக்கிறது எனக் கொண்டால் மற்றொரு துணைஅணிக்கோவை (a/4, a/4, a/4) என்னும் புள்ளியில் தோற்றுவாயைப் பெற்றிருக்கும். ஜெர்மேனியம், சிலிக்கான், கரி (வைரம்) போன்ற தனிமங்களின் படிகங்கள் இந்த இயலமைப்பினைப் பெற்றிருக்கின்றன. இந்த இயலமைப்பு நெருக்கமில்லாப் பொதிவுடையதாகும். ஏனெனில், ஒவ்வோர் அணுவும் நான்கு அண்டை அணுக்களைக் கொண்டிருக்கிறது. அஃதாவது, ஆய எண் நான்கு. இதன் அலகு செல்லின் ஒவ்வொரு மூலையிலும் ஓர் அணுவும், ஒவ்வொரு முகமையத்திலும் ஓர் அணுவும், உள்ளே நான்கு அணுக்களும் உள்ளன. எனவே அலகு செல்லிலுள்ள மொத்த அணுக்கள் $\frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6 + 4 = 8$. மேலேயுள்ள படத்தில் காட்டியுள்ளவாறு

$$xz^2 = \left(\frac{a}{4}\right)^2 + \left(\frac{a}{4}\right)^2 = \frac{a^2}{8}$$

மேலும், $xy^2 = xz^2 + yz^2 = \frac{a^2}{8} + \frac{a^2}{16} = \frac{3a^2}{16}$. ஆனால் $xy = 2\,r$.

இங்கு 'r' என்பது அணுஆரம் (இரு அண்டை அணுக்களுக்கு இடையே உள்ள தூரத்தின் பாதி).

$$\therefore\ xy^2 = (2\,r)^2 = \frac{3a^2}{16}$$

$$\text{அல்லது}\quad a = \frac{8}{\sqrt{3}}\,r$$

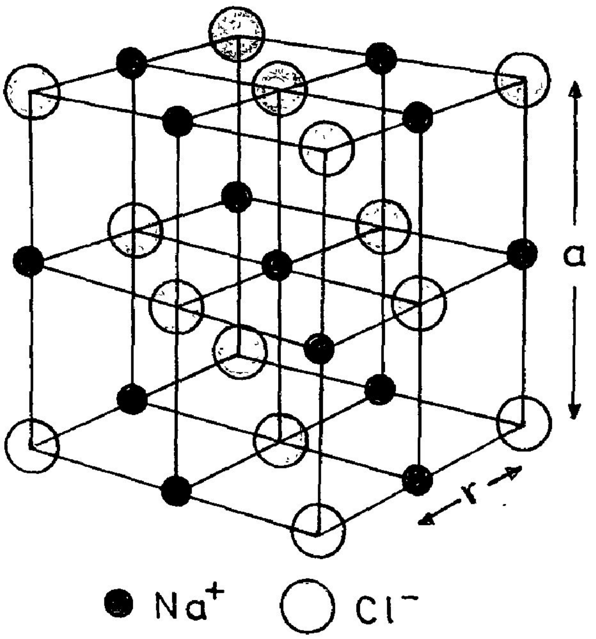
$$\text{பொதிவு அடர்த்தி} = \frac{v}{V} = \frac{8 \times \frac{4}{3}\pi r^3}{a^3}$$

$$= \frac{32\,\pi\,r^3}{3\left(\frac{8r}{\sqrt{3}}\right)^3} = \frac{\sqrt{3}\,\pi}{16}$$

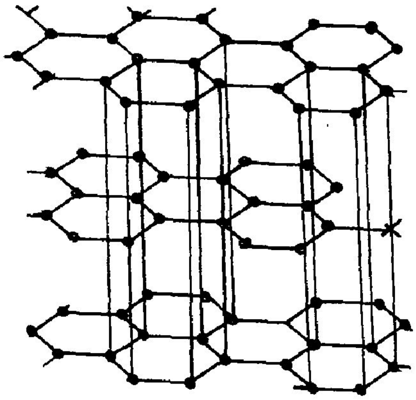
$$= 0.34 \text{ அல்லது } 34\,\%$$

(ஆ) சோடியம் குளோரைடின் இயலமைப்பு

சோடியம் குளோரைடு ஓர் அயனிப் படிகமாகும். இப்படிகத்தில் சோடியம் ஓர்எலெக்ட்ரானை இழந்து நேர்மின் அயனியாகவும், சோடியம் இழந்த எலெக்ட்ரானைக் குளோரின் பெற்று எதிர்மின் அயனியாகவும் மாறுகின்றன.



படம் 3.19 சோடியம் குளோரைடின் இயலமைப்பு



படம் 3.20 கிராபைட்டின் இயலமைப்பு

சோடியம் அயனியும் குளோரின் அயனியும் ஒன்றனையொன்று ஈர்த்துக்கொண்டாலும் அவை குறிப்பிட்ட தூரத்திற்கு மேல் ஒன்றனையொன்று நெருங்கமுடியாதபடி எதிர்ப்புவிசை ஒன்று அங்கே கட்டுப்படுத்துகிறது. சோடியம் குளோரைடின் இயலமைப்பில் சோடியம் அயனியும், குளோரின் அயனியும் அணிக்கோவைப் புள்ளிகளில் அடுத்தடுத்து அமைந்துள்ளன. ஒவ்வோர் அயனியைச்சுற்றிலும் ஆறு எதிர்மின்னூட்ட அயனிகள் உள்ளன. அதனால், ஆய எண்ணின் மதிப்பு ஆறாகும்.

குளோரின் அயனியின் ஆரம் 1.81 ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகள் ஆகும்; சோடிய அயனியின் ஆரம் 0.98 ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகள் ஆகும். சோடியம் குளோரைடின் இயலமைப்பினை உற்றுநோக்கினால் அதன் அலகு செல், இரண்டு கனசதுர துணை அணிக்கோவைகளைக் கொண்டது எனத் தெரியவரும். ஒன்று (0, 0, 0) என்னும் புள்ளியில் தோற்றுவாயை உடையதாயும், மற்றொன்று (a/2, 0, 0) என்னும் புள்ளியில் தோற்றுவாயை உடையதாயும் இருக்கின்றன. இங்ஙனம் இருமுகமையக் கனசதுர இயலமைப்புகள் ஒன்றன்மீது மற்றொன்று மேற்பொருந்துதலால் சோடியம் குளோரைடின் இயலமைப்புக் கிடைக்கிறது.

சீசியம் குளோரைடின் இயலமைப்புச் சோடியம் குளோரைடின் இயலமைப்பினைப்போல் உள்ளது. ஆனால், இங்கு சீசியம், குளோரின் அயனிகள் ஏறத்தாழ சம ஆரமுடையனவாய் உள்ளன. அதனால், எட்டுக் குளோரின் அயனிகள் ஒருசீசியம் அயனியைச் சுற்றி இருக்குமாறு அமைந்த உருவமையக் கனசதுர இயலமைப்பினைத் தர முடியும். அஃதாவது, சீசியம் அயனி உருவமையத்திலும், எட்டு குளோரின் அயனிகள் கனசதுரத்தின் எட்டு மூலைகளில் ஒவ்வொரு மூலைக்கும் ஒன்றாய் அமைந்துள்ளன.

அட்டவணை 3.2
சில படிக வகைகளின் சிறப்பியல்புகள்

வ. எண்	சிறப்பியல்புகள்	வைர கனசதுரம்	எளிய கனசதுரம்	உருவமையக் கனசதுரம்	முகமையக் கனசதுரம்	நெருக்கப் பொதிவுடைய அறுங்கோணம்
1.	அலகு செல்லின் கனஅளவு	a^3	a^3	a^3	a^3	$\frac{3\sqrt{3}\,a^2 c}{2}$
2.	அலகுசெல்லின் மொத்த அணுக்கள்	8	1	2	4	6
3.	ஆயஎண்	4	6	8	12	12
4.	அண்டை அணுத்தூரம் (2r)	$\frac{\sqrt{3}}{4}a$	a	$\frac{\sqrt{3}}{2}a$	$\frac{a}{\sqrt{2}}$	a
5.	பொதிவு அடர்த்தி	0.34	0.52	0.68	0.74	0.74
6.	எடுத்துக்காட்டுகள்	ஜெர் மேனியம், சிலிக்கான், கரி(வைரம்)	பொலோ னியம்	இரும்பு, பேரியம், குரோமியம்	அலுமினியம், தாமிரம், காரீயம், தங்கம்	துத்தநாகம், மக்னீசியம்.

3.7 புற வேற்றுமை (Allotropy)

ஒரு தனிமம் பல இயலமைப்புகளில் அமைந்து, ஒவ்வோர் இயலமைப்பிலும் வேதியியற் குணங்கள் மாறுபடாமலும், இயற்பியற்குணங்கள் மாறுபட்டும் உள்ளதற்குப் **புறவேற்றுமை** என்று பெயர். கோபால்ட் என்னும் உலோகம் சாதாரண வெப்பநிலையில் நெருக்கப் பொதிவுடைய அறுங்கோண இயலமைப்பினை உடையதாயுள்ளது. ஆனால், அதனுடைய வெப்ப நிலையிலிருந்து 477°C அதிகமானால் கோபால்ட் முகமைய இயலமைப்புடைய கனசதுரப் படிகமாக மாறுகிறது. அதேபோல் $\alpha-$ இரும்பு உருவமையக் கன சதுர இயலமைப்பினை உடையதாயும் காந்தப் பொருளாயும் உள்ளது. ஆனால், $\gamma-$ இரும்பு முகமையக் கனசதுர இயலமைப்பினை உடையதாயும், காந்தமற்ற பொருளாயும் உள்ளது. கரியின் புறவேற்றுமைகளாய கிராபைட்டும், வைரமும் வெவ்வேறு இயலமைப்புகளிலும் வெவ்வேறு இயற்பியற் குணங்களை உடையதாய் உள்ளன. வைரம், ஒன்றிற்குள் மற்றொன்று உட்புகுந்து அமைந்த முகமையக் கன சதுர இயலமைப்பினைப் பெற்றிருக்கிறது (படம் 3.18). படிகம் முழுவதும் சக பிணைப்பினால் அணுக்கள் பிணைக்கப்பட்டுள்ளன. அதனால், இது நல்ல மின்கடத்தாப் பொருளாய் விளங்குகிறது. மேலும் கடினமாயும் உள்ளது. ஆனால், கிராபைட்டில் அடுக்கு இயலமைப்பு உள்ளது (படம் 3.20). அஃதாவது, இந்த இயலமைப்பில் கரிஅணுக்கள் தகடுகள் போன்ற அறுங்கோண அமைப்பில் அமர்ந்து, ஒவ்வொரு தகடும் ஒன்றன் மீது ஒன்றாய் அடுக்கிவைக்கப்பட்டுள்ளன. (அபிரகத்திலும் இவ்வித

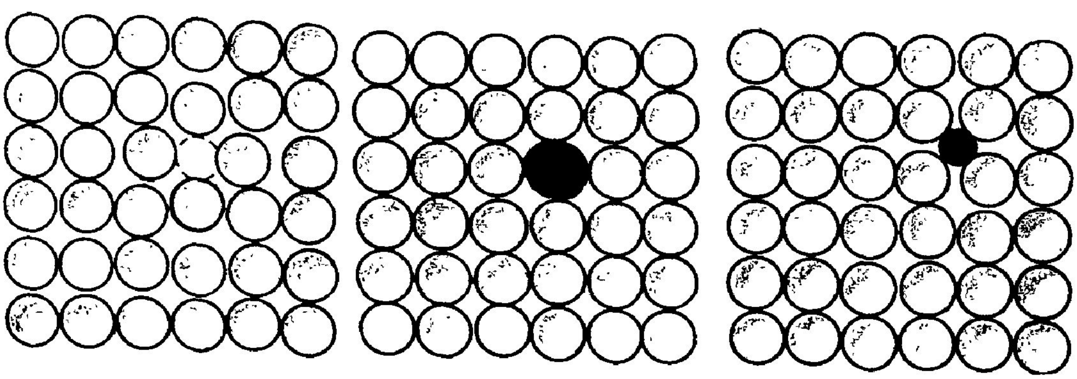
இயலமைப்பினைக் காணலாம்). அடுக்குகளுக்கு இடையே வலுவான அணு இடைப்பிணைப்புகன் இல்லை. எனவே கிராபைட் மென்மையாய் இருப்பதோடு மட்டுமன்றி உயவுப் பொருளாயும் பயன்படுகிறது. அறுங்கோண தகடுகளில் உள்ள கரி அணுக்கள் சக பிணைப்பில் கட்டுண்டும், தகடுகளுக்கு இடையே இணைதிற எலெக்ட்ரான்களில் ஒன்றை கட்டற்றதாக்கிவிட்டு உலோகப்பிணைப்பில் கட்டுண்டும் இருக்கின்றன. ஒரு தகட்டிற்கும் அடுத்ததாய் உள்ள தகட்டிற்கும் இடையேயுள்ள அண்டை அணுத் தூரம் 3.4 Å ஆகும். ஆனால் ஓர் அறுங்கோண தகட்டில் அண்டை அணுத்தூரம் 1.42 Å மட்டுமே. எனவே கிராபைட்டில் வலுவான சகபிணைப்பு தகட்டிலுள்ள அணுக்களுக்கு இடையேயும், வலுவில்லா உலோகப்பிணைப்பு தகடுகளுக்கு இடையேயும் இருப்பதால் கிராபைட் நல்ல மின் கடத்தியாய் விளங்குகிறது.

3.8 படிகச் சீர்கேடுகள் (Crystal imperfections)

இதுவரை நாம் குறையற்ற படிகங்கள் பலவற்றின் சிறப்பியல்புகளைக் கண்டோம். ஆனால், நடைமுறையில் படிகங்கள் சீர்கேடுகள் உடையனவாயிருக்கின்றன. படிகச் சீர்கேடுகளில் பலவகைகள் உள்ளன. படிகச் சீர்கேடுகளை அவற்றின் வடிவியல் அமைப்பினைப் பொறுத்து நான்கு வகைகளாகப் பிரிக்கலாம். அவை புள்ளிக்குறைபாடுகள், வரிச் சீர்கேடுகள், பரப்புச் சீர்கேடுகன், பருமச் சீர்கேடுகள் ஆகியவை ஆகும். படிகச் சீர்கேடுகள் படிகங்களின் எந்திரப் பண்புகள். மின்பண்புகள், வெப்பப் பண்புகள், காந்தப் பண்புகள் போன்றவற்றில் குறிப்பிட்ட அளவு மாற்றுகின்றன. உதாரணமாய் வரிச் சீர்கேடுகள் படிகப் பொருள்களது எந்திர வலிமையை மிகுதியாய்க் குறைக்கும்.

(அ) புள்ளிக் குறைபாடுகள் (Point defects)

புள்ளிக் குறைபாடுகள் சுழிப்பரிமாணச் சீர்கேடுகள் (Zero dimensional imperfections) எனவும் வழங்கப்பெறும். இவை புள்ளி அளவில் ஆன பகுதிகளில் ஏற்படும் குறைபாடுகளாகும். ஒரு புள்ளிக் குறைபாடு, ஒன்று அல்லது இரண்டு அணு விட்டங்கள் அளவு இருக்கும். புள்ளிக்குறைபாடுகள் பலவகைப்படும். அவற்றை ஈண்டுக்காண்போம்.



(அ) (ஆ)

படம் 3.21 காலியிடம் படம் 3.22 (அ) பதிலிமாசு (ஆ) சந்துமாசு

(i) ***காலியிடம்*** (vacancy): புள்ளிக் குறைபாடுகளுள் ஒன்று காலியிடம் எனப்படும். அஃதாவது, ஓர் அணு இருக்கவேண்டிய இடத்தில் ஒன்றும் இல்லாமலிருப்பதாகும். இதனைப் படம் 3.21 காட்டுகிறது. இவ்வகைக் குறைபாடுகள் படிகம் உருவாகும்போதோ, வெப்ப ஆற்றலால் ஏற்படும் அணு அதிர்வுகளின்போதோ ஏற்படலாம்.

படிகம் வளரும்போது சுற்றுப்புறச் சூழ்நிலைகளில் மாற்றம் ஏற்படுவதால் குறையுள்ள பொதிவு ஏற்பட்டு காலியிடங்கள் தோன்றலாம். அதேபோல் அணுக்கள், உயர்வெப்பநிலைகளில் வெப்ப ஆற்றலை உட்கொண்டு ஆற்றல் குறைவாயுள்ள அணிக்கோவைப்புள்ளிகளில் இருந்து வெளியேறிவிடமுடியும். காலியிடங்கள் படத்தில் காட்டியபடி ஒற்றையாகவோ, ஒன்றனுக்கு மேற்பட்டோ இருக்கலாம்.

(ii) ***பதிலி மாசு*** (substitutional impurity) : ஓர்அணு இருக்க வேண்டிய இடத்தில் பிறிதோர் அணு இருக்குமானால் அது **பதிலிமாசு** எனப்படும். இது படம் 3.22 (அ) வில் காட்டப்பெற்றுள்ளது. சிலிக்கான் அணிக்கோவையில் அலுமினியம், பாஸ்பரஸ் போன்றவற்றை மாசுக்களாகச் சேர்த்தல் பதிலி மாசு வகையே. மேலும், தாமிர அணிக்கோவையில் துத்தநாக அணுக்களைச் சேர்த்துப் பித்தளை எனும் உலோக கலவை உண்டாக்கப்படுகிறது. இதில் துத்தநாக அணுக்கள் பதிலி மாசுகளாகும்.

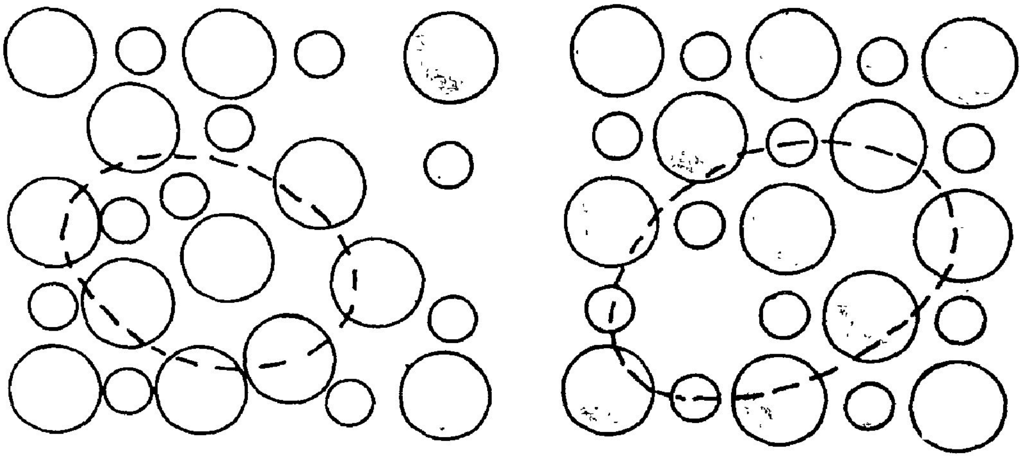
(iii) ***சந்து மாசு*** (interstitial impurity) : அணிக்கோவையில் அணுக்களிடையே சந்துகள் அல்லது காலியிடங்கள் இருக்கும். அணிக்கோவைப்புள்ளிகளிலுள்ள அணுக்களுக்கு எவ்வித இடையூறும் நேராமல் இச்சந்துகளில் ஒருவேற்றுப்பொருள் அணு சென்று அமருமானால் அது "***சந்து மாசு***" எனப்படும். இது படம் 3.22 (ஆ) வில் காட்டப்பட்டுள்ளது. அணுக்களிடையே உள்ள சந்து வெளியில் ஓரணுபோய் அமர வேண்டுமானால் அதன் அளவு படிக அணுவினுடையதைவிடச் சிறியதாயிருக்க வேண்டும். எடுத்துக்காட்டாய் 1.25 ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகள் ஆரமுள்ள இரும்பு அணுக்களாலாய முகமையக் கன சதுர இயலமைப்புடைய இரும்பில், 0.777 ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகு ஆரமுடைய கரி அணுக்கள் சந்து மாசுக்களாய் அமையும். இவை முகமையக் கன சதுர இயலமைப்பின் எண் முகக் குழிவுகளில் சென்று அமருகின்றன. ஆனால், கரி அணுவின் ஆரம் அக்குழிவின் ஆரத்தைவிடப் பெரியதாய் இருப்பதால் அங்குத் திரிபு (strain) ஏற்படும்.

(iv) ***உள்ளார்ந்த குறைபாடுகள்*** (Intrinsic defects)

ஒரு படிகத்தில் தகைவின் (stress) மூலம் அதனை நெருக்கி இறுக்கும்போதோ, அழுத்தும்போதோ சில அணுக்கள் அணுக்கோவைப் புள்ளிகளிலிருந்து வெளியேறிக் காலியிடங்களிலோ, மேற்கூறப்பட்ட சந்துகளிலோ சென்று அமரும். இவ் வகைக் குறைபாடுகளைச் ***சந்து அணுச் சீர்கேடுகள்*** (self interstitial imperfections) என்பர். இவற்றை உள்ளார்ந்த குறைபாடுகள் என்றும் கூறுவர். அயனிப்படிகங்களில் இவ்வித்க் குறைபாடுகள் எங்ஙனம் உருவாகின்றன என்பது பற்றிக் காண்போம்.

அயனிப்படிகங்களில் புள்ளிக்குறைபாடுகள் ஏற்படும்போது பொருளின் மின் நடுநிலைமை குலைந்துவிடக்கூடாது. அயனிப்படிகங்களில் இந்த நிபந்தனையையொட்டி இருவகையான புள்ளிக் குறைபாடுகள் தோன்றும். அவை ***பிரெங்கல் குறைபாடு*** (frenkel defect), ***ஸ்காட்டி குறைபாடு*** (schottky defect) என்பனவாகும். அயனிப்படிகங்களில் நேர்

அயனிகள் (cations) அளவில் சிறியனவாயிருக்குமானதால் இவை அயனிப் படிகத்தின் அணிக்கோவைப் புள்ளிகளிலிருந்து இடம் பெயர்ந்து சந்துகளில் சென்று அமரும். இதனைப் 'பிரெங்கல்குறைபாடு' என்பர். எதிர் அயனிகள் (anions) அளவில் பெரியனவாதலால் அணிக் கோவைச் சந்துகளில் நுழையமுடியாது. அதனால், இவை இடம்பெயர்ந்து சந்துகளில் சென்று அமர்தல் அரிது. கால்சியம் புளுரைடு, வெள்ளி ஹாலைடுகள் ஆகியவற்றில் ஏற்படும் புள்ளிக் குறைபாடுகள் பிரெங்கல் குறைபாடுகளாகும் (படம் 3.23 (அ)).



(அ) (ஆ)

படம் 3.23 (அ) பிரெங்கல் குறைபாடு. (ஆ) ஸ்காட்டி குறைபாடு

ஓர் அயனிப் படிகத்திலிருந்து ஒருநேர்அயனி, அதன் துணையான ஓர் எதிர் அயனி ஆகிய இரண்டும் சேர்ந்து அணிக்கோவையிலிருந்து வெளியேறிவிட்டால் அல்லது இல்லாது போய்விட்டால் ஓர் இரட்டை (pair) காலியிடங்கள் ஏற்படுகின்றன. இது ஸ்காட்டி குறைபாடு ஆகும். இரண்டும் ஒரே அளவிற்கு அயனியாக்கம் பெற்றவையாயிருந்தால்தான் இவ்வகைக் குறைபாடு ஏற்படும். ஏனெனில், அப்போதுதான் மின் நடுநிலைமை கெடாமலிருக்கும். இவ்வகைக் குறைபாடுகள் காரஹாலைடுகளில் (alkali halides) மிகுதியாய்த் தோன்றுகின்றன. படம் 3.23 (ஆ) வில் இக்குறைபாடு காட்டப்பட்டுள்ளது. புள்ளிக்குறைபாடுகள், படிகம் வளர்க்கும்போதும், வெப்ப ஆற்றல் மிகுதியாயிருக்கும்போதும் தோன்றுகின்றன எனப்பார்த்தோம். மேலும், இவை மின்குறைபாடுகளாலும் தோன்றலாம். மின்குறைபாடுகள் திண்மப் பொருள்களில் மின்னூட்டப் பகிர்வில் குறைகள் ஏற்படும்போது தோன்றுகின்றன. இக்குறைகள் மின்புலத்தின் உதவியால் படிக முழுவதும் கட்டற்று இயங்கமுடியும். அதன் மூலம் சில திண்மப் பொருள்களுக்குச் சிறிது மின்கடத்துந்திறனும் கிடைக்கிறது. உதாரணமாய்த் துத்தநாக ஆக்ஸைடை எடுத்துக்கொண்டால், துத்தநாக அயனிகள் சந்துகளில் நிறைய இருக்கலாம். அதன் காரணமாக அந்த இடங்களில் நேர் மின்னூட்டங்கள் மிகுதியாகும். சில இடங்களில் துத்தநாக அயனிகள் காணாமற்போய்விட்டால் அங்கெல்லாம் அதிகமான எதிர் மின்னூட்டங்கள் இருக்கும். எக்ஸ் கதிர்கள், நுண்ணலை கதிர்வீச்சு, ஒளி போன்றவற்றின்மூலம் படிகத்திலுள்ள அணுக்களில் கிளர்ச்சி உண்டாக்கிப் புள்ளிக் குறைபாடுகளைத் தோற்றுவிக்கலாம்.

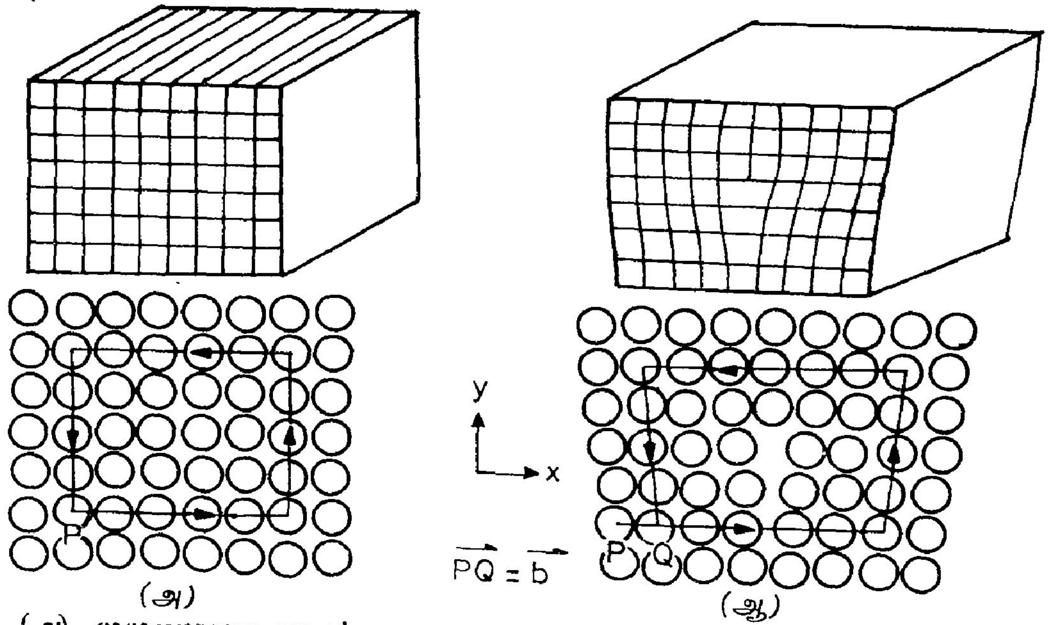
புள்ளிக்குறைபாடுகள் படிக இயலமைப்பின் உள்ளே குலைவை (distortion) ஏற்படுத்துகின்றன. மேலும் படிகத்தின் மின்தடையை மாற்றுகின்றன. புள்ளிக்குறைபாடு காலியிடமாக இருந்தால் அங்கு அணு இடைப்பிணைப்பு இருக்காது. அதனால், அந்த இடத்தில் எந்திர வலிமை குறையும். அதேபோல் ஓரிடத்தில் மாசு அணு இருந்தால் அதன் அளவு வேறுபாடு காரணமாய்த் திரிபு அந்த இடத்தில் ஏற்படும். புள்ளிக்குறைபாடுகள் படிகத்தின் கட்டற்ற ஆற்றலைக் (free energy) குறைக்கின்றன.

(ஆ) **வரிச் சீர்கேடுகள்** (line imperfections)

வரிச் சீர்கேடுகள், இருப்பு மாறல்கள் (dislocations) எனப்பெயர்பெறும். ஒரு படிகத்தின் இரு குறைவில்லாப் பகுதிகளுக்கு இடையே உள்ள சமநிலையில்லா அல்லது குறைவுள்ள பகுதியில் வரிச் சீர்கேடு இருக்கும். அங்குப் படிகத்தின் சமச்சீராய் அமைந்துள்ள அணுக்கள் உள்ள தளத்தின் ஒரு பகுதி சமநிலையுள்ள அதன் இருப்பிடத்திலிருந்து இடம் பெயர்ந்திருக்கும். இக்குறைபாட்டை இருப்புமாறல் என்னும் பெயரால் வழங்குவர். இருப்புமாறலைச் சுற்றி மீட்சித் திரிபு (elastic strain) புலமும், அதனுடன் கூடிய தகைவுகளும் இருக்கும். இருப்புமாறல், வழுக்கல் (slip) என்னும் நிகழ்ச்சியில் முக்கியப் பங்கு வகிக்கிறது. வழுக்கல் நிகழ்ச்சி மூலம் அநேக உலோகங்கள் இளகு நிலையையுடையனவாய் உருமாறுகின்றன. மேலும், வழுக்கல் நிகழ்ச்சி, திரிபு கடினப்படுத்தல் (strain hardening), இளகுநிலைப் புள்ளி (yield point), சரிதல் (creep), தளர்ச்சி (fatigue), நொறுங்கும் முறிவு (brittle fracture) ஆகியவற்றோடு தொடர்பு கொண்டுள்ளது. அதனால் ஒருபடிகத்தில் வழுக்கல்,வழுக்கலில்லாப் பகுதிகளைப் பிரிக்கும் அணிக்கோவையினுள் பாதிப்புள்ள பகுதியே "இருப்புமாறல்' என்று நாம் ஒரு முடிவிற்கு வரலாம். ஒரு படிகத்தின் இருப்புமாறல்கள் படிகம் வளரும்போது ஏற்படும் விபத்துகளாலும், வெப்பத்தகைவுகளாலும், கட்டமாற்றங்களாலும் ஏற்படுகின்றன. வடிவியலின்படி இவற்றை "ஒற்றைப் பரிமாண குறைபாடுகள்' என அழைக்கலாம். இவற்றில் இருவகையுண்டு. அவை விளிம்பு இருப்புமாறல், திருகியல் இருப்புமாறல் ஆகும். இருப்புமாறல்களின் அளவினைப் **பர்கர்ஸ் வெக்டார்** (Burgers vector) எனப்படும் ஒருவெக்டாரால் அளப்பது வழக்கம். இருப்புமாறலின் அளவையும், திசையையும் பர்கர்ஸ் வெக்டார் குறிக்கிறது.

(i) **விளிம்பு இருப்புமாறல்** (edge dislocation)

படம் 3.24 (அ) வில் ஒருநிறைவுடைய படிகம் காட்டப்பட்டுள்ளது. மேலேயுள்ள படம் முப்பரிமாணத்தில் உள்ள படிகத்தையும் கீழேயுள்ள படம் படிகத்தின் முன் பக்கத்திலுள்ள அணுக்களையும் காட்டுகின்றன. ஒரு முழுமையான படிகத்தினுள் அதிகப்படியாக ஓர் அரைத்தளத்தை (half-plane) நுழைத்தோமானால் விளிம்பு இருப்புமாறல் ஏற்படுகின்றது. (அரைத்தளத்திற்குப் பதிலாகப் படிக அடித்தளம் வரை செல்லாத ஏதாவதொரு முழுமையற்ற தளத்தை நுழைக்கும்போதுகூட விளிம்பு இருப்பு மாறல் ஏற்படும்). இந்த அரைத்தளத்தின் விளிம்பினைச் சுற்றியுள்ள பகுதியின் மேற்புறத்தில் அணுக்கள் நெருக்கியடித்துக்கொண்டு இறுக்க நிலையில் இருப்பதனையும், கீழ்ப்பகுதியில் அணுக்கள் விலகி, ஓர் இழுவிசைக்கு உள்ளாகிய நிலையில் இருப்பதையும் நாம் பார்க்கலாம். இந்த அமைப்பு அரைத்தளத்தின் ஊடே படிகம் முழுவதும் பரவியிருக்கும். அஃதாவது, படிகத்தினுள்ளும் பரவியிருக்கும். மேற்கூறியவாறு அணுக்களின்



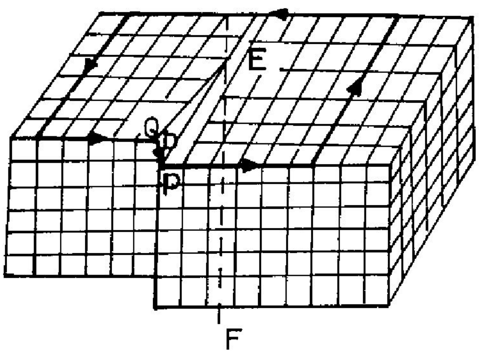
படம் 3.24 (அ) முழுமையான படிகம்
(ஆ) விளிம்பு இருப்புமாறலுடையது ; அதிகப்படியாக ஓர் அரைத்தளம் உள்ளது

அமைப்பில் ஏற்படும் திரிபு அரைத்தளத்தின் விளிம்புக் கோட்டைச் சுற்றியுள்ள பகுதியிலேயே ஏற்படுகின்றது. எனவே இக் குறைபாடு விளிம்பு இருப்புமாறல் எனப்படுகின்றது. அரைத்தளம் மேலிருந்து கீழ்வந்தால் ஏற்படும் குறைபாட்டை நேர்விளிம்பு இருப்புமாறல் என்பர். இதை ⊥ எனக்குறியிடுவர். அங்ஙனமிராமல் அரைத்தளம் கீழிருந்து மேலே வந்தால் அதனால் ஏற்படும் குறைபாட்டை எதிர்விளிம்பு இருப்புமாறல் (T) என்பர்.

விளிம்பு இருப்புமாறலை வேறு ஒருவழியின் மூலமும் புரிந்துகொள்ளலாம். ஒரு முழுமையான படிகத்தின் கிடைத்தளத்தில் படிகத்தின் வல முனையிலிருந்து அதன் நடுப்பகுதிவரை சுழியளவு தடிமனுள்ள ஒருபிளவு, படிகத்தினுள் உண்டாக்கப்படுவதாகக் கொள்வோம். இத்தளத்தை வழுக்கல் தளம் (slip plane) என்பர். படிகம் ஒருசறுக்குப்பெயர்ச்சியை (shear) அடையும்போது வழுக்கல் தளத்தை ஒட்டிய அணுக்கள் இடம் பெயருகின்றன. அதனால், வழுக்கல் தளத்தின் ஒருபக்கத்திலுள்ள அணுக்கள் அதன் மற்றொரு பக்க அணுக்களைவிட அதிகமாய் இடம் பெயருகின்றன. வழுக்கல் தளத்தையொட்டி உள்ள அணுக்கள் இடம் பெயர்ந்துள்ள பகுதியை வழுக்கல் நடந்த பகுதி என்றும், அணுக்கள் இடம் பெயராமல் உள்ள பகுதியை வழுக்கலில்லாப்பகுதி என்றும் கூறுவர். இங்ஙனம் வழுக்கல் தளத்தில் வழுக்கல் நடந்த பகுதியையும் வழுக்கலில்லாப் பகுதியையும் பிரிக்கும் கோடு அல்லது எல்லை, விளிம்பு இருப்புமாறல் கோடு (dislocation line) ஆகும். இனி பர்கர்ஸ் சுற்று (burgers circuit) பற்றிச் சிறிது காண்போம். படம் 3.24 (அ) வை எடுத்துக்கொள்வோம். அதில் 'P' எனும் ஒருபுள்ளியிலிருந்து x அணுத்தூரங்கள் நேராகச் சென்று, பின் அங்கிருந்து 'y' அணுத்தூரங்கள் மேல் நோக்கிச்சென்று, பின் இடப்புறம் திரும்பி, 'x' அணுத்தூரங்கள்

சென்று அங்கிருந்து கீழே 'y' அணுத்தூரங்கள் சென்றால் நாம் புறப்பட்ட இடத்திற்கே வந்து சேருவோம். இவ்வாறு வரையப்படும் ஒரு சுற்று பர்கர்ஸ் சுற்று எனப்படும். நாம் ஒரு முழுமையான படிகத்தில் எந்தவோர் இடத்தில் இச் சுற்றினை வரைந்தாலும், சுற்றுச் சரியாய் முற்றுப்பெறும். அவ்வாறன்றி ஒரு குறைபாடுள்ள இடத்தினைச் சுற்றி இந்த பர்கர்ஸ் சுற்றை வரைந்தால் சுற்று முற்றுப்பெறாது. அச்சுற்றினுள் ஒருகுறைபாடு அடங்கியுள்ளதெனக் கூறலாம். எடுத்துக்காட்டாகப் படம் 3.24 (ஆ) வில் 'P' யிலிருந்து பர்கர்ஸ் சுற்றினைத் தொடங்க அது 'Q' வில் வந்து முடிகிறது. அதனால், புறப்பட்ட இடத்திற்கு வந்து சேர, 'b' தூரம் பின்வர வேண்டியுள்ளது. இங்கே $\vec{b}$ என்பது பர்கர்ஸ் வெக்டராகும்.

(ii) **திருகியல் இருப்புமாறல்** (Screw dislocation)



படம் 3.25 திருகியல் இருப்புமாறல்

ஒரு படிகத்தின் ஒருபகுதியில் உள்ள அணுக்கள் படிகத்தின் மீதமுள்ள பகுதிக்கு ஏற்ப இடம் பெயரும்போது இயல்பான படிகத்தளம் இருப்புமாறல் கோட்டைச் சுற்றி ஒரு திருகு வடிவில் (spiral ramp) அமையும். அதனால் தான் இந்த இருப்புமாறலைத் திருகியல் இருப்புமாறல் என வழங்குகின்றனர். விளிம்பு இருப்புமாறலில் ஓர் அணுத்தளத்தின் முனை படிகத்தினுள் உருவாகிறது. ஆனால், திருகியல் இருப்புமாறலில் இருப்புமாறல் ஏற்பட்ட பகுதியில் உள்ள அணிக்கோவையின் அலகு செல்களில் மட்டும் இருப்புமாறல் ஏற்படுகிறது. மேலும் விளிம்பு இருப்புமாறலில், இருப்புமாறல் கோட்டிற்குச் செங்குத்தாய் இடப்பெயர்ச்சியின் திசை உள்ளது. ஆனால், திருகியல் இருப்புமாறலில் இருப்புமாறல் கோட்டிற்கு இணையாய் இடப்பெயர்ச்சியின் திசை உள்ளது. படம் 3.25இல் காட்டப்பட்டுள்ளபடி பர்கர்ஸ் சுற்று மூலம் பர்கர்ஸ் வெக்டாரைக் கண்டுபிடித்துத் திருகியல் இருப்புமாறலின் அளவையும், திசையையும் கண்டு பிடிக்கலாம். படத்தில் EF என்பது இருப்புமாறல் கோடாகும். சாதாரணமாய்ப் படிகங்களில் விளிம்பு அல்லது திருகியல் இருப்புமாறல்கள் தனித்துக் காணப்படாது

இரண்டும் கலந்த இருப்புமாறலாகத்தான் காணப்படும். ஒரு படிகத்தில் பிராங்க்–ரீட் மூலம் (Frank-Read source) வழியாக இருப்புமாறல்களைப் பெருக்கலாம். படிகங்களில் உள்ள காலியிடங்கள் அல்லது வெற்றிடங்கள் இருப்புமாறல்கள் தோன்ற வழி வகுக்கின்றன. உயர் வெப்பநிலை மீக் கடத்திகளில் (high temperature superconductors) இருப்புமாறல்களின் அடர்த்திக்கு ஏற்பப் பெயர்வு வெப்பநிலை மாறுகிறது.

(இ) பரப்புச் சீர்கேடுகள் (Surface imperfections)

பரப்புச் சீர்கேடுகள், இருபரிமாணக் குறைபாடுகளாகும். இவற்றில் இரு பெரும்வகைகள் உள்ளன. அவை வெளிப்பரப்புச் சீர்கேடுகள், உட்பரப்புச் சீர்கேடுகள் ஆகும்.

(i) **வெளிப்பரப்புச் சீர்கேடுகள்** (External surface imperfections)

வெளிப்பரப்பைப் படிக இயலமைப்பின் முடிவு எல்லை எனப் பார்க்கிறோம். எனினும், வெளிப்பரப்பிலுள்ள அணுக்களைப் படிகத்தினுள் உள்ள அணுக்களோடு ஒப்பிட முடியாது. ஏனெனில், வெளிப்பரப்பு அணுக்கள் தங்கள் அண்டை அணுக்களை ஒரு பக்கத்தில்மட்டும் கொண்டுள்ளன. ஆனால், படிகத்தினுள் உள்ள அணுக்கள் அண்டை அணுக்களை அவற்றின் எல்லாப் பக்கங்களிலும் கொண்டுள்ளன. மேலும் வெளிப்பரப்பு அணுக்கள் முழுமையாய் மற்றைய அணுக்களால் சூழப்படாததாலும் அணு இடைப்பிணைப்புகள் வெளிப்பரப்பிற்குமேல் நீட்டப்படாததாலும், அவை படிகத்தினுள் உள்ள அணுக்களைவிட அதிக ஆற்றல் பெற்றுள்ளன. இதனால் வெளிப்பரப்புச்சீர்கேடுகள் தோன்றுகின்றன.

(ii) **உட்பரப்புச் சீர்கேடுகள்** (Internal surface imperfections)

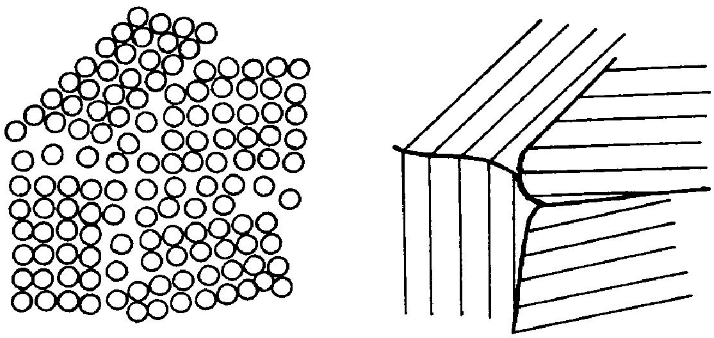
உட்பரப்புச் சீர்கேடுகள் அணுத்தள அடுக்குகளின் எல்லைகளில் மாற்றம் ஏற்படுவதால் உண்டாகின்றன. அணுத்தள அடுக்குகளில் முகப்பு நிலை மாறுவதாலும் அல்லது அவற்றின் மடக்கில் (sequence) மாற்றம் நிகழ்வதாலும் இக்குறைபாடுகள் தோன்றலாம். உட்பரப்புச் சீர்கேடுகள் பல வகைப்படும். கீழே வருபவை அவற்றுள் முக்கியமானவை :

(அ) படிகத்துகள் எல்லைகள் (grain boundaries)
(ஆ) சாய்வு எல்லைகள் (tilt boundaries),
முறுக்கு எல்லைகள் (twist boundaries)
(இ) இரட்டை எல்லைகள் (twin boundaries)
(ஈ) அடுக்குக் குறைபாடுகள் (stacking faults)
(உ) இரும்பியல் காந்தப் பெருங்கூறு சுவர்கள் (ferromagnetic domain walls)

(அ) படிகத்துகள் எல்லைகள்

ஒருதுண்டு இரும்பையோ, தாமிரத்தையோ எடுத்துக்கொண்டால் அவை தனிப்படிகங்களல்ல ; பல படிகத்துகள்களின் (grains) சேர்க்கையே ஆகும். ஒவ்வொரு துகளிலும் அணுக்களின் அமைப்புகள் வெவ்வேறு திசைகளில் இருக்கும். பல படிகத்துகள்கள் வளர்ந்து, பின் ஒன்றுசேர்ந்து திண்மமாக உருவாகும்போது இப்படிகத்துகள்களிடையே எல்லைப்பரப்புகள் உண்டாகின்றன. இவை படிகத்துகள் எல்லைகள் எனப்படும். இவை

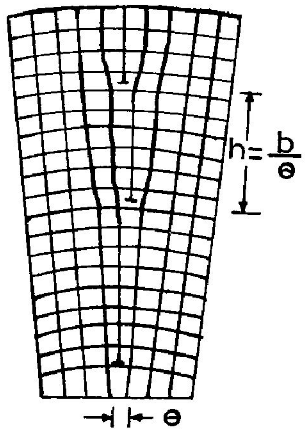
படம் 3.26இல் காட்டப்பட்டுள்ளன. இதில் படிகங்களது அமைப்பு நிலைகள் உடனுக்கு உடன் மாறுவதனைப் பார்க்கலாம். இங்கே அமைப்புநிலை மாறுபாடுகள், 10° – 15° க்கு



படம் 3.26 படிகத்துகள் எல்லைகளில் அணுவரிசைகள் (உயர் கோணப்படிகத்துகள் எல்லைகள்)

மேற்பட்டுள்ளன. இத்தகைய எல்லைகள் "**உயர்கோண படிகத்துகள் எல்லைகள்** (high angle grain boundaries)" எனப்படும். உயர்கோண எல்லைகளில் அணுஅமைப்பு நிலைகள் மிகத் திரிந்துகாணப்படும். மேலும் எல்லைப்பகுதி, சில அணுவிட்டங்கள் அளவே இருக்கும். இரண்டு படிகப் பகுதிகளிடையேயுள்ள கோணம் 10° – க்குள் குறைவாய் இருக்குமானால் அது தாழ்கோண படிகத்துகள் எல்லை (low angle grain boundary) எனப்படும்.

(ஆ) சாய்வு எல்லைகளும், முறுக்கு எல்லைகளும் :



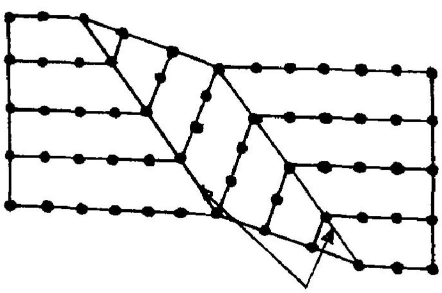
படம் 3.27 சாய்வு எல்லை (தாழ்கோணப் படிகத்துகள் எல்லை)

சாய்வுஎல்லைகள் தாழ்கோண படிகத்துகள் எல்லைகளின் ஒருசிறப்பு நேர்வு ஆகும். சாய்வு எல்லைகளைச் சமதூரங்களில் அமைந்த, நேர் விளிம்பு இருப்புமாறல்களாகக்

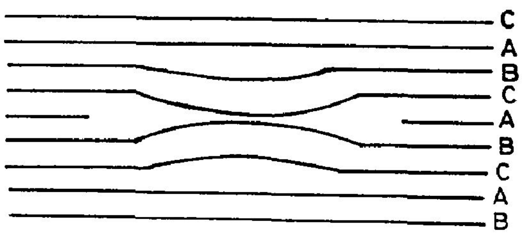
கருதலாம். இவற்றின் சாய்வுக் கோணம் 'θ' வைப் பர்கர்ஸ் வெக்டாரைப் ($\vec{b}$) பயன்படுத்திக் கண்டுபிடிக்கலாம். அஃதாவது, $\frac{b}{h} = \tan\theta$. சாய்வுக்கோணம் சிறியதாக இருந்தால் $\frac{b}{h} = \theta$. இதில் 'h' என்பது அடுத்தடுத்துள்ள இரண்டு விளிம்பு இருப்புமாறல்களுக்கு இடையேயுள்ள நேர்குத்துத்தூரம் ஆகும். முறுக்கு எல்லைகளை (twist boundaries), இரண்டாம்தர தாழ்கோண படிகத்துகள் எல்லைகள் எனக் கூறலாம், இதனைத் திருகியல் இருப்புமாறல்கள் உள்ள ஒருதொகுதி எனக் கருதலாம்.

(இ) இரட்டை எல்லைகள்

இரட்டை எல்லை எனப்படும் உட்பரப்புக் குறைபாட்டில், எல்லைக்கு ஒரு பக்கத்திலுள்ள அணுக்கள் மறுபக்கத்திலுள்ள அணுக்களின் ஆடித்திருப்பமாய் (mirror reflection) அமையும். அஃதாவது, தவறான முகப்புநிலை உள்ள இருதனிப்படிகங்களின் பகுதிகள் சமமாய் இருந்து அவை இரண்டையும் ஒன்றாக இணைத்தால் அவையிரண்டையும் இணைக்கும் எல்லை ஒரு திருப்புச் சமச்சீர் (reflection symmetry) தளமாய் அமையும். அவ்விரண்டு படிகப் பகுதிகளும் இரட்டையாய் அமையும் (படம் 3.28).



படம் 3.28 இரட்டைஎல்லைகள்,



படம் 3.29 அடுக்குக் குறைபாடு

(ஈ) அடுக்குக் குறைபாடுகள்

அணுத்தளங்கள் ஒன்றன்மீதொன்றாய் அடுக்கும்போது தவறுகள் ஏற்படுவதுண்டு. அதனை அடுக்குக்குறைபாடுகள் என வழங்குவர். எடுத்துக்காட்டாய் *ABC ABC* ... என ஒருமுகமையக் கனசதுரப் படிகம் அமைக்கப்படும் போது ஒருகுறிப்பிட்ட அணுத்தளம் 'A' யின் (படம் 3.29) ஒருசிறுபகுதியில் அணுக்கள் அமையாது போய்விடலாம். அங்கே *ABC BC* .... என்ற அமைப்பு வந்து விடுகிறது. இது நெருக்கப் பொதிவுள்ள அறுங்கோண இயலமைப்புக்குரியது. அதனால், இதனை ஓர் உட்பரப்புக்குறைபாடு என எடுத்துக்கொள்ளலாம்.

(உ) இரும்பியல் காந்தப் பெருங்கூறுசுவர்கள்

ஓர் இரும்பியல் காந்தப் பொருளின் இரு பெருங்கூறுகளில் (domains) காந்தமாக்கச் செறிவு (intensity of magnetisation) வெக்டார்களின் திசைகளில் மட்டும் வேறுபட்டு உள்ளதாய்க்கொள்வோம். இச் சிறுபகுதிகளைப் பிரிக்கும் எல்லையும் ஒருகுறைபாடாகும். இக் குறைபாட்டையே இரும்பியல் காந்தப் பெருங்கூறுச் சுவர் என அழைக்கிறோம். இப்பெருங்கூறு அமைப்புகளே இரும்பியல் பொருள்களின் காந்தப் பண்புகளை வரையறுக்கின்றன.

(ஊ) பருமச் சீர்கேடுகள் (Volume imperfections)

படிகங்களில் வேற்றுப்பொருள்கள் பெரும்அளவில் திட்டுத்திட்டாகச் சேர்தல், பெரிய குழிவுகள் அல்லது காலியிடங்கள் ஏற்படுதல், படிகமற்றப் பகுதிகள் இருத்தல் போன்றவை பருமச் சீர்கேடுகளாகும். இந்தச் சீர்கேடுகளின் அளவு குறைந்தது 10 முதல் 30 ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகளாவது இருக்கவேண்டும். உலோகப் படிகங்களில் படிகத்தளங்கள் அடுக்கப்படும்போது அவற்றில் நிலைமின் வேறுபாடுகள் சிறிதளவு நேரிடினும் உடனே பிளவுகள் தோன்றும். இப்பிளவுகளும் பருமச் சீர்கேடுகளைச் சேர்ந்தவையாகும்.

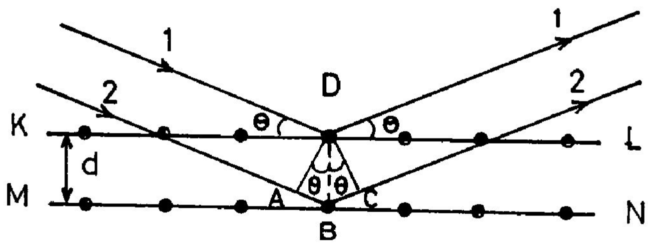
3.9 எக்ஸ் கதிர் விளிம்பு விளைவும், பிராக்கின் விதியும்

எக்ஸ் கதிர்கள் 1 ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகிலிருந்து 100 ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகள் வரை அலைநீளமுள்ள மின்காந்த அலைகளாகும். எக்ஸ்கதிர்களின் அலைநீளம் சாதாரண ஒளியின் அலை நீளத்தைவிட மிகச் சிறியது. விளிம்பு விளைவு (diffraction) காண பிளவு அல்லது தடையின் அளவு, பிளவின் வழியே செல்லும் கதிர்வீச்சு அல்லது தடையின் மீது படும் கதிர்வீச்சின் அலை நீளத்துடன் ஒப்பிடும்படியாய் இருக்கவேண்டும். அதனால், எக்ஸ்கதிர்களின் விளிம்பு விளைவைக் காணக் கீற்றணியின் (grating) கோடுகளுக்கிடையே உள்ள தொலைவு சில ஆங்க்ஸ்ட்ராம்களே இருக்கவேண்டும். படிகங்களின் அணுத் தளங்களுக்கு இடையே உள்ள பிளவுகள் அல்லது இடைத்தொலைவுகள் சில ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகளே இருப்பதால் அவை எக்ஸ்கதிர் விளிம்பு விளைவை ஏற்படுத்த வல்லனவாயுள்ளன. அதனால் படிகத்தை ஒரு முப்பரிமாண கீற்றணி எனக்கூறலாம். டபிள்யு.எல்.பிராக் (W.L.Bragg) , டபிள்யு. ஹெச். பிராக் (W.H.Bragg) இந்துப்பு (rock-salt)ப் படிகத்தைப் பயன்படுத்தி எக்ஸ்கதிர்களின் விளிம்பு விளைவைக் கண்டுபிடித்தனர். இனிப் பிராக்கின் விதியைச் சற்று விரிவாகக் காண்போம். பிராக்கின் விதி, படிகத்தளங்களால் சிதறப்பட்ட இரு எக்ஸ்கதிர்க் கற்றைகள் மேற்பொருந்துவதன்மூலம் பொலிவான பெருமச் செறிவு (maximum intensity) உண்டாக, அவற்றிற்கிடையேயான பாதைவேறுபாடு (path difference) எக்ஸ்கதிரின் அலைநீளத்தின் முழுஎண் மடங்காய் அமைதல் வேண்டும். அஃதாவது,

$$2\,d \sin\theta = n\lambda$$

இதில் n = 1, 2, 3.... பெருமச் செறிவுபட்டைகளின் வரிசை ஆகும். மேலும் 'd' என்பது இரு அணிக்கோவைத் தளங்களுக்கு இடையேயான செங்குத்துத் தூரமாகும்; 'θ' என்பது

அணிக்கோவைத் தளத்திற்கும், படுகதிருக்கும் இடையே உள்ள விளிம்பு விளைவுக் கோணம் (diffraction angle) ஆகும். 'λ' என்பது எக்ஸ் கதிர்கற்றையின் அலைநீளம் ஆகும். படிகத்தினுள் KL, MN என்ற இரண்டு இணைத் தளங்களை எடுத்துக்கொள்வோம்.



படம் 3.30 பிராக்கின் விதியைத் தருவித்தல்

ஒற்றை அலைநீளம் 'λ' கொண்ட எக்ஸ்கதிர்க் கற்றை 'θ' என்ற தொடுகோணத்தில் படுவதாகக்கொள்வோம். படுகதிரின் ஒருபகுதி KL என்னும் தளத்திற்பட்டு எதிரொளிப்பு அல்லது சிதறல் அடைகிறது. மற்றொரு பகுதி MN என்னும் தளத்தில் பட்டு எதிரொளிப்பு அடைகிறது. (படம் 3.30). இவ்விரு தளங்களில் எதிரொளிக்கப்பட்ட எக்ஸ்கதிர்க் கற்றைகள் மேற்பொருந்துகின்றன என வைத்துக்கொள்வோம். KL, MN என்னும் தளங்களில் எதிரொளிக்கப்பட்ட எக்ஸ்கதிர்களுக்கு இடையே உள்ள பாதைவேறுபாடு $(AB + BC)$ ஆகும். ஆனால், $AB = BC = BD \sin\theta = d\sin\theta$. ஆகவே, $AB + BC = 2\, d \sin\theta$. அதனால் தளங்களில் விளிம்பு விளைவு அடைந்த எக்ஸ்கதிர்கள் மேற்பொருந்தும்போது பெருமச் செறிவு ஏற்பட இந்தப்பாதை வேறுபாடு $2\, d \sin\theta = n\lambda$ என இருக்கவேண்டும். இதுவே பிராக்கின் விதி எனப்படும்.

3.10 பிராக்கின் விதியும், படிக இயலமைப்பும்

படிக இயலமைப்பைக்காண எக்ஸ்கதிர் விளிம்பு விளைவு மிகவும் பயனுள்ளதாயுள்ளது. எக்ஸ்கதிர் விளிம்பு விளைவின்மூலம் விளிம்பு விளைவுக்கோணம் அல்லது பிராக்கின் கோணம் (Bragg's angle) கண்டுபிடிக்கமுடியும். அதன்மூலம் தளங்களுக்கு இடையே உள்ள தூரத்தைக் கணக்கிடமுடியும். ஏனெனில், முதல் பெருமச் செறிவின்போது

$$\frac{1}{d} = \frac{2\sin\theta}{\lambda}$$

அதனால், குறிப்பிட்ட அலைநீளமுள்ள எக்ஸ்கதிரைப் பயன்படுத்தும் போது மூன்று வேறுபட்ட தளங்களில் எக்ஸ்கதிர் எதிரொளிப்பு அடைந்தால் முதல் பெருமச் செறிவில்,

அலைநீளம் $\lambda = 2\, d_{100} \sin\theta_{100} = 2\, d_{110} \sin\theta_{110} = 2\, d_{111} \sin\theta_{111}$

என இருக்கும். இதனைப் பின்வருமாறு எழுதலாம்.

$$\frac{1}{d_{100}} : \frac{1}{d_{110}} : \frac{1}{d_{111}} = \sin\theta_{100} : \sin\theta_{110} : \sin\theta_{111}$$

இங்கு $d_{100}, d_{110}, d_{111}$ ஆகியவை மூன்று வேறுபட்ட தள இடைத்தூரங்களாகும். $\sin\theta_{100}$, $\sin\theta_{110}$, $\sin\theta_{111}$ ஆகியவை மேற்கூறிய மூன்று தளங்களின் பிராக்கின் கோணங்களாகும்.

எளிய கனசதுரத்திற்கு, $\dfrac{1}{d_{100}} : \dfrac{1}{d_{110}} : \dfrac{1}{d_{111}} = \sqrt{1} : \sqrt{2} : \sqrt{3}$

உருவ மையக் கனசதுரத்திற்கு $\dfrac{1}{d_{100}} : \dfrac{1}{d_{110}} : \dfrac{1}{d_{111}} = 1 : \dfrac{1}{\sqrt{2}} : \sqrt{3}$

முகமையக் கனசதுரத்திற்கு $\dfrac{1}{d_{100}} : \dfrac{1}{d_{110}} : \dfrac{1}{d_{111}} = 1 : \sqrt{2} : \sqrt{3}/2$

அதனால் பிராக் கோணங்களின் விகிதங்களைக் கண்டுபிடித்து, அதன்மூலம் ஒருபடிகம் எந்த அணிக் கோவையைச் சேர்ந்தது என்பதனைத் தெரிந்து கொள்ளலாம்.

படிக அணிக்கோவை எந்த வகையைச்சேர்ந்தது என்பது தெரிந்தால், அலகுசெல்லில் உள்ள அணுக்கள் அல்லது மூலக்கூறுகளின் எண்ணிக்கை தெரிந்துவிடும் ; அதன் மூலம் அணிக்கோவை மாறிலி (lattice constant) 'a' யின் மதிப்பினைக் கணக்கிடமுடியும். 'ρ' என்பது படிகத்தின் அடர்த்தி எனவும், a^3 என்பது அலகு செல் பருமன் எனவும் கொண்டால், அலகு செல் நிறை ρa^3 ஆகும். ஆனால்,

$$\rho\, a^3 = n \frac{M}{N}$$

இங்கு n = அலகு செல்லில் உள்ள அணுக்கள் அல்லது மூலக்கூறுகளின் எண்ணிக்கை

M = அணு எடை அல்லது மூலக்கூறின் எடை

N = அவகட்ரோ எண்.

உதாரணமாய்ச் சோடியம் குளோரைடு படிகத்தை எடுத்துக் கொண்டால், அது முகமையக் கன சதுரத்தில் படிகமாகிறது. அதனால், அதன் அலகு செல்லில் 4 மூலக் கூறுகள் இருக்கும்.

அதனால்

$$a^3 = \frac{nM}{\rho N} = \frac{4 \times 58.5}{2180 \times 6.02 \times 10^{26}}$$

$\therefore a = 5.630 \times 10^{-10}$ மீ = 5.630 ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகள். இங்கு 5.63 ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகள் என்பது ஓரின அணுக்களுக்கு இடையே உள்ள தூரமாகும். அஃதாவது, இரண்டு அடுத்தடுத்துள்ள சோடிய அணுக்கள் அல்லது குளோரின் அணுக்களுக்கு இடையே உள்ள தூரமாகும். இதன்மூலம் அடுத்தடுத்துள்ள சோடியம், குளோரின் அணுக்களுக்கு இடையே உள்ள தூரம் $\frac{5.630}{2} = 2.815$ ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகள் ஆகும். இதுவே (100) தளங்களுக்கு இடையே உள்ள தூரமும் ஆகும். ஏனெனில், கன சதுர இயலமைப்புகளுக்கு

$$d = \frac{a}{(h^2 + k^2 + l^2)^{1/2}}$$

பொதுவாய்க் கன சதுர இயலமைப்பு உள்ள படிகங்களில் பெருமச் செறிவு வரிகள் குறைவாயும், கனசதுர இயலமைப்பு இல்லாப்படிகங்களில் அவை அதிகமாயும் காணப்படுகின்றன. பெருமச் செறிவு வரிகளை ஒளிப்படங்கள் (photographs) எடுக்கும்போது பெருமச் செறிவு வரிகளின் இருப்பிடங்கள் படிக அலகு செல்லின் அமைப்பினையும், அளவையும் எடுத்துக்காட்டுகின்றன.

மேலும், விளிம்பு விளைவு வரிகளின் செறிவு, அணுக்களின் இருப்பிடங்களைத் தெரிவிக்கின்றன. உதாரணமாய்ச் சோடியம் குளோரைடில், (111) தளங்களுக்கு உரிய விளிம்பு விளைவு வரிகளில், அடுத்தடுத்த வரிகளில் பெருமச் செறிவு கூடியும், குறைந்தும் காணப்படும். அதனால், அடுத்தடுத்த (111) தளங்களில் முழுதும் சோடிய அணுக்கள் அல்லது குளோரின் அணுக்கள் இருக்கவேண்டும். குளோரின் அணுக்கள் சோடிய அணுக்களைவிடக் கனமாய் (heavier) இருப்பதால், அவைகளின் பெருமச் செறிவு வரிகளில் அதிகச் செறிவும், சோடிய அணுக்களின் பெருமச் செறிவு வரிகளில் குறைந்த செறிவும் உள்ளன. அதனால், சோடியம் குளோரைடு படிகத்தின் அலகு செல்லில் சோடிய அணுக்களும் குளோரின் அணுக்களும் அடுத்தடுத்து அடுக்கப்பெற்றிருக்கின்றன.

மேற்கூறிய பெருமச் செறிவு வரிகளைப் படிகங்களில் கண்டறிய ***லாவேமுறை*** (Laue method), ***மாவு முறை*** (powder method), ***படிகச் சுழற்றுமுறை*** (rotating crystal method) ஆகியவை பயன்படுத்தப்படுகின்றன. இவற்றில் மாவுமுறையின் மூலம் பல்படிக (poly-crystalline)ப் பொருள்களின் இயலமைப்பினைக் கூடக் காணலாம்.

3.11 தனிப் படிகம் வளர்த்தல்

தனிப் படிகம் வளர்த்தல் என்பது ஒரு கலையாகும். பெரிய அளவுள்ள, சீர்கேடு அற்ற தனிப் படிகம் வளர்த்தல் என்பது அவ்வளவு எளிதான காரியம் அன்று. இன்று உலகளவில் தனிப் படிகங்களுக்கு மிகுந்த கிராக்கி ஏற்பட்டுள்ளது. தனிப் படிகங்கள், எலெக்ட்ரானிய உபகரணங்களில் மிகுதியாய்ப் பயன்படுகின்றன. ஒளியைப் பயன்படுத்திச் செய்தி பரப்பும் முறையிலும் பயன்படுகின்றன. சூரிய ஒளியைப் பயன்படுத்தி மின்னாற்றல் உருவாக்கச் சிலிக்கான் படிகங்கள் தேவை. லேசர் என்னும் ஓரியல் மூலத்தை உருவாக்கக் காலியம் ஆர்சனைடு என்ற படிகம் தேவை. தனிப் படிகம் (single crystal) ஒன்றனை

எவ்வாறு வளர்க்கலாம் என்பது பற்றிச் சிறிது காண்போம். பெரும்பாலும் உருகிய சுத்தமான பொருள்களின் மூலம் தனிப் படிகங்கள், செக்ரால்ஸ்கி தொழில் நுட்ப (Czochralski's technique) முறையில் வளர்க்கப்படுகின்றன. இம்முறையில் ஜெர்மேனியம், சிலிக்கான் போன்ற படிகங்களை வளர்க்கலாம். ஆவி நிலையில் கூடத் தனிப்படிகங்கள் வெர்ன்யுல் (Verneuil) முறை மூலம் வளர்க்கப்படுகின்றன. இம் முறையில் மெல்லேடு (thinfilm) நிலையில் மீக்கடத்திகள், காந்த உலோகக் கலவைகள், அரிதிற் கடத்திகள் தனிப் படிகங்களாகக் கிடைக்கின்றன.

மாதிரிக் கணக்குகள்

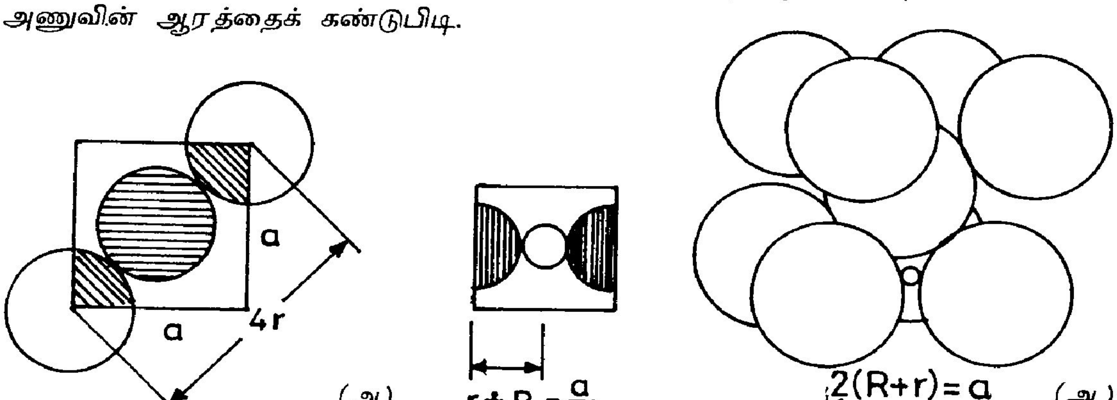
1. வைரத்தின் அடர்த்தியைக் கணக்கிடுக. அதன் அணிக்கோவை மாறிலியின் மதிப்பு 3.57×10^{-10} மீ. ஆகும்.

$$\text{அடர்த்தி} = \frac{\text{அலகுசெல்லிலுள்ள அணுக்களின் நிறை}}{\text{அலகு செல்லின் கன அளவு}} = \frac{nM}{a^3 N}$$

$$= \frac{8 \times 12}{(3.57 \times 10^{-10})^3 \times 6.023 \times 10^{26}}$$

$$= 3503 \text{ கிலோ கிராம்/மீ}^3$$

2. முகமையக் கன சதுர இயலமைப்பின் உருவ மையத்திலும் உருவமைய கன சதுர இயலமைப்பின் அணுக்களிடையே உள்ள சந்திலும் நுழையக் கூடிய மிகப்பெரிய அணுவின் ஆரத்தைக் கண்டுபிடி.



படம் 3.31 (அ) முகமையக் கனசதுரத்தின் ஒருமுகமும் அதன் உருவமையத்திலுள்ள வேற்று அணுவும்

(ஆ) உருவ மையக் கனசதுரத்தின் கட்டமைப்பும், அதனுள் உள்ள வேற்று அணுவும்.

முகமையக் கன சதுர இயலமைப்பில் (படம் 3.31 (அ) $4r = \sqrt{2}a$ (அல்லது) $a = 4r/\sqrt{2}$

இங்கு 'r' என்பது அணு ஆரமும், 'a' என்பது அணிக்கோவை மாறிலியும் ஆகும். முகமையக் கன சதுர இயலமைப்பில் உருவமையத்தில் நுழையக்கூடிய அணுவின் ஆரம் 'R' எனக் கொள்க.

$$r + R = a/2$$

$$R = \left(\frac{a}{2}\right) - r = \frac{4\,r}{2\sqrt{2}} - r = r\,(\sqrt{2} - 1) \quad \therefore R = 0.414\,r$$

படம் 3.31 (ஆ) வில் காண்பித்துள்ளபடி உருவமையக் கனசதுர இயலமைப்பிற்குள் நுழைக்கப்பட்ட வேற்று அணுவின் ஆரம் 'R' எனக் கொள்க. எனவே

$$2\,(R + r) = a$$

(அல்லது) $R = (a/2) - r$

உருவமையக் கனசதுர இயலமைப்பிற்கு

$$2\,r = (\sqrt{3}/2)\,a$$

'a' யின் மதிப்பை முந்தைய சமன்பாட்டில் இட,

$$R = \frac{4\,r}{2\sqrt{3}} - r = \left[\frac{2 - \sqrt{3}}{\sqrt{3}}\right] r$$

$$\therefore R = 0.1547\,r.$$

3. தாமிரம் முகமையக் கன சதுர இயலமைப்பில் படிகமாகிறது. அதன் அடர்த்தி 8960 கிலோ கிராம்/ மீ^{3}, அணு எடை 63.54 ஆனால், அதன் அணிக்கோவை மாறிலி மதிப்பு என்ன?

தாமிரப் படிக அலகு செல்லில் 4 அணுக்கள் உள்ளன. 6.023×10^{26} அணுக்களின் நிறை = 63.54 கிலோ கிராம் ஆகும்.

$$\therefore 4 \text{ அணுக்களின் நிறை} = \frac{63.54 \times 4}{6.023 \times 10^{26}} \text{ கிலோ கிராம்}$$

$$\text{எனவே அடர்த்தி} = \frac{4 \text{ அணுக்களின் நிறை}}{\text{அலகு செல்லின் கன அளவு}}$$

$$8960 = \frac{63.54 \times 4}{a^3 \times 6.023 \times 10^{26}}$$

(அல்லது) $$a^3 = \frac{63.54 \times 4}{6.023 \times 10^{26} \times 8960}$$

$\therefore\ a = 3.61 \times 10^{-10}$ மீ (அல்லது) 3.61 ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகள்.

4. ஒருவெள்ளிப் படிகத்தின்மீது எக்ஸ் கதிர்விழும்போது அது (111) தளத்தின் விளிம்பு விளைவு அடைந்த கற்றையைப் பிராக்கோணமான 19° 12′ இல் ஏற்படுத்துகிறது. வெள்ளி முகமையக் கனசதுர இயலமைப்பினை உடையது. அதன்

அடர்த்தியும், அணு எடையும் முறையே 10500 கிலோகிராம் /மீ^{3}, 107.87 ஆகும். படுகதிரின் அலைநீளத்தைக் கண்டுபிடி.

$$\text{அடர்த்தி} = \frac{\text{அலகுசெல்லிலுள்ள அணுக்களின் நிறை}}{a^3}$$

$$\therefore a^3 = \frac{4 \times 107.87}{6.02 \times 10^{26} \times 10500}$$

(அல்லது) $a = 4.09$ ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகள்.

பிராக்கின் விதிப்படி,

அலை நீளம் $\lambda = 2d \sin\theta$

இதில் d = இரு அண்டைத்தளங்களுக்கு இடையே உள்ளதூரம் $= \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$

d - இன் மதிப்பையும், θ–வின் மதிப்பையும் சமன்பாட்டில் இட

$$\lambda = \frac{2a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \sin 19^\circ\, 12'$$

$$= \frac{2 \times 4.09}{\sqrt{3}} \times 0.3289$$

$= 1.553$ ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகள்.

5. ஒரு மோல் திண்மத்தில் வெப்பச் சமநிலையில் காலியிடங்களின் எண்ணிக்கையை, $n = N \exp(-\Delta H_f / RT)$ என்ற சமன்பாடு தரும். இதில் ΔH_f என்பது ஒரு மோல் பொருளில் காலியிடங்கள் உருவாகத் தேவையான வெப்பம். N என்பது அவகட்ரோ எண் (6.023×10^{23}/மோல்), R என்பது வாயு மாறிலி (8.314 ஜூல்/மோல்/கெல்வின்). தாமிரத்தின் $\Delta H_f = 120$ கிலோ ஜூல்/மோல் எனில் $0\ K$, $300\ K$ மற்றும் $900\ K$ வெப்பநிலைகளில் 1 மோல் தாமிரத்தில் உள்ள காலியிடங்களின் எண்ணிக்கையைக் கணக்கிடுக.

(அ) 0 கெல்வினில்,

$$n = 6.023 \times 10^{23} \exp\left(-\frac{120 \times 10^3}{8.314 \times 0}\right) = 6.023 \times 10^{23} \exp(-\infty)$$

$= 0$ ஏனெனில் $\exp(-\infty) = 0$.

அஃதாவது, சுழி கெல்வினில் தூய தாமிர படிகத்தில் காலியிடங்களே இராது.

(ஆ) 300 கெல்வினில்,

$$n = 6.023 \times 10^{23} \exp\left(\frac{-120 \times 10^3}{8.314 \times 300}\right)$$

$$= 6.023 \times 10^{23} \exp(-48.112)$$

$= 767$ காலியிடங்கள்/மோல்.

(இ) 900 கெல்வினில்,

$$n = 6.023 \times 10^{23} \exp\left(\frac{-120 \times 10^3}{8.314 \times 900}\right)$$

$$= 6.023 \times 10^{23} \exp(-16.037)$$

$= 6.53 \times 10^{16}$ காலியிடங்கள்/மோல்.

எனவே தாமிரத்தின் வெப்பநிலை உயர, காலியிடங்களின் எண்ணிக்கை அடுக்குக் குறியில் உயருகிறது.

சுருக்கம்

(1) படிகங்கள் திசைசார்ந்தப் பண்புகளை உடையனவாகும். 7 வகைப் படிகங்கள் 14 வகை பிரவே அணிக்கோவைகளில் அடங்கும்.

(2) படிக அணிக்கோவையைப் பிரதிபலிக்கும் மிகச்சிறு பகுதியே அலகுசெல் எனப்படும். அதனைத் திரும்பத்திரும்ப முப்பரிமாணங்களிலும் அடுக்குவதால் படிகம் கிடைக்கும். மூல அலகு செல் a, b, c என்னும் வெக்டார்களால் வரையறுக்கப்பட்டு ஒரேயொரு அணிக்கோவைப்புள்ளியை மட்டும் கொண்டிருக்கும்.

(3) மில்லர் எண்கள் படிக அணிக்கோவையினூடே செல்லும் தளங்களையும் திசைகளையும் குறிக்கப்பயன்படுகின்றன. தளங்களை (hk$l$) என்றும், திசைகளை [h k l] எனவும் குறியிடுவது வழக்கம்.

(4) படிகங்களில் நேர்பெயர்ச்சி சமச்சீர், சமச்சீர் மையம், சமச்சீர்தளம் மற்றும் சமச்சீர் அச்சு போன்றவை முக்கிய சமச்சீர் கூறுகளாகும். மேலும், சுழல் தலைகீழாக்க அச்சு, திருகு அச்சு மற்றும் நழுவுதளம் போன்ற கலப்பின சமச்சீர் கூறுகளும் உள.

(5) அணிக்கோவைக்கு ஒருமடக்கு, இருமடக்கு, மும்மடக்கு, நான்மடக்கு, அறுமடக்கு சுழற்சி அச்சுக்கள்தான் இருக்கமுடியும். அதற்கு மேற்பட்ட அச்சுகளோ, ஐந்து மடக்கு அச்சோ இருக்கமுடியாது.

(6) படிகவகைகளில் முகமையக் கனசதுர இயலமைப்பும், நெருக்கப் பொதிவுடைய அறுங்கோண இயலமைப்பும் நெருக்கப் பொதிவைப் பெற்றுள்ளன.

(7) வடிவியல் அடிப்படையில் படிகச்சீர்கேடுகளைப் புள்ளிக்குறைபாடுகள், வரிச் சீர்கேடுகள், பரப்புச் சீர்கேடுகள், பருமச்சீர்கேடுகள் எனப் பிரிக்கலாம்.

(8) காலியிடம், பதிலிமாசு, சந்துமாசு, பிரெங்கல் குறைபாடு, ஸ்காட்டி குறைபாடு போன்றவை முக்கியப் புள்ளிக் குறைபாடுகளாகும்.

(9) வரிச்சீர்கேடுகள் இருப்புமாறல்கள் எனப்படும். விளிம்பு இருப்புமாறல் மற்றும் திருகியல் இருப்புமாறல் போன்றவை முக்கிய வகைகளாகும்.

(10) பரப்புச் சீர்கேடுகளில் உட்பரப்புச் சீர்கேடுகள், வெளிப்பரப்புச் சீர்கேடுகள் என இருவகையுள்ளன.

வினாக்கள்

1) கனசதுர இயலமைப்பில் உள்ள மூன்று அணிக்கோவைகளின் சிறப்பு அம்சங்களைக் கூறுக.

2) வைர இயலமைப்பின் ஆய எண் மற்றும் பொதிவு அடர்த்தியைக் கணக்கிடுக. வைரத்திற்கும், கிராபைட்டிற்கும் உள்ள வேறுபாடுகளை அவற்றின் இயலமைப்புகளால் விளக்குக.

3) மக்னீசியத்தின் இயலமைப்பு பற்றித் தெளிவாய் விளக்கி, அதன் அச்சு விகிதத்தைக் கணக்கிடுக.

4) சமச்சீர் செயற்பாடு என்றால் என்ன? பல்வகை சமச்சீர்ச் செயற்பாடுகளைக் கூறி, எளிய கனசதுரத்தின் சமச்சீர் உறுப்புகளைக் கணக்கிடுக.

5) மில்லர் எண்கள் என்றால் என்ன? அவற்றை எவ்வாறு தீர்மானிப்பாய்? ஓர் எளிய கனசதுரத்தில் (111), (010) தளங்களையும், [111], [$\bar{1}$11] திசைகளையும் படம்வரைந்து காட்டுக.

6) ஓர் எளிய கனசதுர இயலமைப்பில்,

$$d_{100} : d_{110} : d_{111} := \sqrt{6} : \sqrt{3} : \sqrt{2}$$

என நிரூபி.

7) வெள்ளி முகமையக் கனசதுர இயலமைப்பினைக் கொண்டுள்ளது. அதன் அணு ஆரம் 1.441 ஆங்ஸ்ட்ராம் அலகுகள் ; அதன் (220) தளங்களுக்கு இடையே உள்ள தூரத்தைக் கணக்கிடுக

(1.441 ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகள்).

8) துத்தநாகம், நெருக்கப் பொதிவுடைய அறுங்கோண இயலமைப்பில் உள்ளது. அதன் அலகுசெல்லின் உயரம் 4.94 ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகள், அணு மையங்கள் 2.7 ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகள் இடைவெளியில் உள்ளன. துத்தநாகத்தின் அலகுசெல்லின் கனஅளவையும், அடர்த்தியையும் கணக்கிடுக.

(9.1×10^{-29} மீ^{3} ; 7160 கிலோ கிராம்/மீ^{3})

9) ஜெர்மேனியம், வைரத்தின் இயலமைப்பினைக் கொண்டு படிகமாகிறது. அதன் அலகுசெல்லில் எட்டு அணுக்கள் உள்ளன. அதன் அணிக்கோவை மாறிலி 5.62 ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகள். ஜெர்மேனியத்தின் அடர்த்தியைக் கணக்கிடுக.

(5460கிலோ கிராம்/மீ^{3})

10) படிகச்சீர்கேடுகள் பற்றி ஒருகட்டுரை வரைக.

11) சிறுகுறிப்பு வரைக

(அ) மில்லர் எண்கள்

(ஆ) அலகுசெல்

(இ) திருகு அச்சு

(ஈ) புள்ளிக்குறைபாடுகள்

(உ) இருப்புமாறல்கள்

(ஊ) உட்பரப்புச் சீர்கேடுகள்

மேற்கோள் நூற்பட்டியல் :

1. 'The Structure and Properties of solids' – B. Chalmers, Heyden, London, 1982.

2. 'A Text book of Materials Technology' – L.H. Van Vlack, Addition – Wesley Publishing Company, Phillippines, 1973.

3. 'Introduction to Solid State Physics' – C. Kittel, Wiley Eastern Limited, New Delhi, Fourth Reprint, 1985.

4. 'Solid State Electronic Engineering Materials' – S.O. Pillai, Wiley Eastern Limited, New Delhi, 1992.

5. 'எக்ஸ் கதிர்களும், படிகவியலும்' – சி.உ. பிள்ளை, தமிழ்நாட்டுப் பாட நூல் நிறுவனம், சென்னை, 1978.

4. திண்மங்கள் பற்றிய எலெக்ட்ரான் கொள்கை

4.1 அறிமுகம்

எலெக்ட்ரான் கொள்கை, உலோகங்கள், அலோகங்கள், மின்கடத்தாப் பொருள்கள் ஆகியவற்றின் இயலமைப்புகளையும், பண்புகளையும் அணுக்கொள்கை மூலம் விளக்குகிறது. இது திண்ம நிலையிலுள்ள உலோகங்களுக்கும், அலோகங்களுக்கும் பொருந்தும் ஒரு பொதுவான கொள்கையாய் விளங்குகிறது. எலெக்ட்ரான் கொள்கை மூலம் திடப்பொருள்களில் எவ்வகையான பிணைப்பு விசைகள் உள்ளனவென்றும், உலோகங்களின் ஆற்றல் மட்டங்களையும், கடத்திகள், மின்கடத்தாப் பொருள்கள் ஆகியவற்றின் பண்புகளையும், காந்தவியல், மீட்சியியல் போன்ற பலபகுதிகளையும் அறியலாம். எலெக்ட்ரான் கொள்கை மூன்று முக்கியப் பருவங்களில் வளர்ச்சியுற்றது. முதல் பருவத்தில் அது மிகப்பழைய கட்டற்ற எலெக்ட்ரான் கொள்கை (classical free electron theory) என்னும் பெயரில் வளர்ந்தது. இதனை 1900 ஆண்டுவாக்கில் ட்ரூடும் (Drude), இலாரென்சும் (Lorentz) மிகப்பழைய எந்திரவியல் (classical mechanics) அடிப்படையில் தோற்றுவித்தனர். பின்னர் இது கவளக் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான் கொள்கை (quantum free electron theory) என்னும் பெயரில் 1928 ஆம் ஆண்டு சாமர்பெல்டு (Sommerfeld) என்பவரால் கவள விதிகளின்படி மாற்றியமைக்கப்பட்டது. அதே ஆண்டு பிளாக் (Bloch) என்பவர் எலெக்ட்ரான்கள் அணிக்கோவையின் சீரலைவு அல்லது மடக்குநிலை மின்புலத்தில் (periodic field) இயங்கும்போது உண்டாகும் பண்புகளை அடிப்படையாய் வைத்து மண்டலக் கொள்கையை (zone theory) உருவாக்கினார். இன்று எலெக்ட்ரான் கொள்கை கடலெனப் பரந்து இருந்தாலும், அது குறிப்பாய்ப் படிக இயலமைப்பிற்கு ஒவ்வாத பண்புகளையே நன்கு விளக்குகிறது. அதனால் படிகங்களில் உள்ள சீர்கேடுகள் (imperfections) பற்றித் தெரிந்து கொள்ள முயலும்போது எலெக்ட்ரான் கொள்கை நமக்குச் சிறிதளவே உதவி செய்கிறது.

4.2 மிகப்பழைய கட்டற்ற எலெக்ட்ரான் கொள்கை (Classical free electron theory)

இக்கொள்கையின் முக்கிய எடுகோள்கள் அல்லது சரத்துகள் பின்வருமாறு :

1. ஒருதிண்ம நிலையிலுள்ள உலோகம் அணுக்களால் ஆனது. ஒவ்வோர் அணுவிலும் ஓர் உட்கரு உள்ளது. ஒவ்வொரு உட்கருவைச் சுற்றியும் எலெக்ட்ரான்கள் உள.
2. உலோகத்தின் ஒவ்வொரு அணுவிலும் உள்ள இணைதிற எலெக்ட்ரான்கள், கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களாகி உலோகத்தின் பருமன் முழுவதும் தன்னிச்சையாய் இயங்கி வருகின்றன. உலோகத்தின் இவ்விதக் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களே ஓர் எலெக்ட்ரான் வாயுவாய் மாறுகின்றன. மேலும், கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்கள் அனைத்தும் ஒருமாறா மின்னழுத்தத்தின் ஆளுகைக்கு உட்பட்டுள்ளன. இந்த மின்னழுத்தம், எலெக்ட்ரான் வாயு அடங்கிய அணிக்கோவையிலுள்ள உலோக அயனிகளின்மூலம் வருகிறது. இதனையே நாம் வாயு ஒன்றினை உள்ளடக்கிய கலம் (vessel) ஒன்றனுக்கு இணையாய்க் கூறலாம். இந்த அடிப்படையில்

கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களின் இயக்கம் வாயுக்களின் இயக்கவியற்கொள்கைக்குக் கீழ்ப்படியும்.

3. வாயுக்களின் இயக்கவியற் கொள்கையைப் பின்பற்றுவதால் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களிடையே இடைவினை ஏதும் இல்லை.

4. ஒருமின்புலத்தை உலோகத்தினுள் செலுத்தும்போது கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்கள் முடுக்கம் பெறுகின்றன. முடுக்கம் பெற்ற எலெக்ட்ரான்கள் மின்புலத்திசைக்கு எதிர்த்திசையில் விரைந்து இயங்குகின்றன. ஆனால், மின்புலம் இல்லாதபோது கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்கள் எல்லாத் திசைகளிலும் இயங்கிக் கொண்டிருக்கும்; அதனால், குறிப்பிட்ட திசையில் அவற்றின் சராசரித்திசைவேகம் சுழியாகும்.

5. ஒரு குறிப்பிட்ட ஆற்றலுள்ள எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கையைக் கணக்கிடும்போது மாக்ஸ்வெல்–போல்ட்ஸ்மேன் புள்ளியியல் (Maxwell–Boltzmann statistics) விதிகளைப் பின்பற்ற வேண்டும்.

மிகப்பழைய கட்டற்ற எலெக்ட்ரான் கொள்கையால் (அணுக்கொள்கையின் மூலம்) ஓமின்விதியை (Ohm's law) தருவிக்கவும், உலோகங்களின் வெப்பங்கடத்தல், மின்கடத்தல் போன்றவற்றை விளக்கவும், உலோகங்களின் ஒளியியற் குணங்களை விளக்கவும், வீட்மென்– ப்ரான்ஸ் விதி (Wiedemann–Franz law) யைத் தருவிக்கவும் முடியும். எனினும், அதில் பல குறைபாடுகள் தோன்றின. முதலாவதாய் மிகப் பழையகொள்கைப்படித் தருவிக்கப்பட்ட உலோகங்களின் மொத்தத் தன்வெப்ப ஏற்புத்திறனின் மதிப்பு 4.5R என இருந்தது. இதில் 'R' என்பது பொது வாயு மாறிலி. ஆனால், நடைமுறையில் மொத்தத் தன்வெப்ப ஏற்புத்திறனின் மதிப்பு 3R என இருக்கிறது. அக்கொள்கையில், தன்வெப்பஏற்புத்திறன் மதிப்பில் எலெக்ட்ரானின் பங்கு மூலம் வரும் மதிப்பு 1.5R என உள்ளது. ஆனால், நடைமுறையில் எலெக்ட்ரானின் பங்கு 0.01R என்றே உள்ளது. மேலும், தாழ்ந்த வெப்பநிலைகளில் தன்வெப்பஏற்புத்திறன் மதிப்பு ஏறத்தாழச் சுழியாய் மாறிவிடுவதை மிகப்பழைய கொள்கையால் விளக்க முடியவில்லை. மிகப்பழைய கொள்கைப்படி, உலோகத்தின் தன்வெப்ப ஏற்புத்திறன் வெப்பநிலையைச் சார்ந்ததில்லை. இக்கருத்து நடைமுறையோடு பொருந்தி வரவில்லை. இரண்டாவதாய் குறைகடத்திகள், மின்கடத்தாப்பொருள்கள் ஆகியவற்றின் மின்கடத்துந்திறன் பற்றி இம் மாதிரியின்மூலம் அறிந்துகொள்ள முடியவில்லை. மூன்றாவதாய் மிகக் குறைந்த வெப்பநிலைகளில், உலோகத்தின் மின்கடத்துந் திறனும் 'σ', வெப்பங்கடத்துந் திறனும் 'K' வெவ்வேறு வீதங்களில் மாறுபடுகின்றன. அதனால் $\frac{K}{\sigma T}$ என்பது ஒரு மாறிலியல்ல. ஆனால், மிகப்பழங்கொள்கையின்படி $\frac{K}{\sigma T}$ என்பது ஒரு மாறிலியாகும். நான்காவதாய் மிகப்பழங்கொள்கையின்படி வந்த பாராக்காந்த காந்த ஏற்புத்திறனின் (susceptibility) மதிப்புச் சோதனைகளின் மூலம் வந்த மதிப்பைவிட அதிகமாயிருந்தது. இக்குறைபாடுகளைக் களையவே, கவளக் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான் கொள்கை தோன்றியது.

4.3 கவளக் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான் கொள்கை (Quantum Free Electron Theory)

சாமர்பெல்டு என்பவர் பிளாங்கின் கவளக் கொள்கையைப் பின்பற்றி, டி பிராலியின் (de Broglie) பருப்பொருள் பற்றிய கருத்தையும், ஷ்ரோடிங்கரின் (Schroedinger) அலைச் சமன்பாட்டையும் அடிப்படையாகக் கொண்டு கவளக் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான் கொள்கையை உருவாக்கினார். அதன்படி உலோகத்தில் ஒருசீரான மாறா மின்னழுத்தத்தில் உள்ள உலோக அணுக்களின் இணைதிற எலெக்ட்ரான்களே கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களாய் விளங்குகின்றன ; மேலும், இயங்கும் எலெக்ட்ரான் பல அலைகள் கொண்ட ஓர்அமைப்பாய்ச் செயல்படுகிறது. அஃதாவது, எலெக்ட்ரானின் அலைப்பண்பிற்கு முக்கியத்துவம் கொடுக்கப்பட்டுள்ளது.

4.3.1 பருப்பொருளின் இரட்டைப் பண்பு (Dual nature of matter)

பருப்பொருளானது நுண்ணிமம் அல்லது துகள் பண்பு (particle nature) உடையதென்பதும், ஆற்றலானது அலைப் பண்பு உடையதென்பதும் அனைவரும் அறிந்தனவே. ஆனால், கரும்பொருள் கதிர்வீச்சின் (black body radiation) ஆற்றல் பங்கீட்டை விளக்குவதற்குப் பிளாங்க் வெளியிட்ட கவளக் கொள்கையின்படி கதிர்வீச்சிக்கும் துகள் பண்பு உண்டு என்னும் கருத்துத் தோன்றியது. நிறையில்லா போட்டான்கள் என்னும் துகள்களே கதிர்வீச்சின் ஆற்றலைத் தம்மிடையே கொண்டுள்ளன என்ற கருத்து அறிவியல் உலகில் ஒரு புரட்சியை உண்டு பண்ணியது. இதனைத் தொடர்ந்து பிளாங்க் கொள்கை வழியில் ஒளிமின் விளைவுக்காய (photoelectric effect) விளக்கத்தை ஐன்ஸ்டைன் தந்து, அதற்காக நோபல் பரிசினையும் பெற்றார். ஹைடிரஜனின் நிறமாலையில் தோன்றும் வரிகளுக்கு போர் (Bohr) கொடுத்த அணுக்கொள்கையும் ஆற்றலின் துகள் பண்பினை உறுதிப்படுத்தியது. இங்ஙனம் ஒளி போன்ற ஆற்றலுக்கு அலைப் பண்பும், துகள்பண்பும் இருக்கின்றன என்பது பரிசோதனைகளின் மூலம் நிரூபிக்கப்பட்டது. அதனால், 1924 ஆம் ஆண்டு லூயி டி பிராலி (Louis de Broglie) என்னும் பிரான்சு தேசத்து அறிஞர் பின்வரும் கருத்தை வெளியிட்டார். அதன்படி இயற்கை (nature) பலவழிகளில் சமச்சீராய் உள்ளது. நாம் பார்க்கும் பேரண்டம், ஆற்றலாலும், பருப்பொருளாலும் அமைந்துள்ளது. பரிசோதனைகளின் முடிவுகள், ஆற்றலுக்கு இரட்டைப் பண்பு இருப்பதாய்த் தெளிவுபடுத்தியுள்ளன. அஃதாவது, கரும்பொருள் கதிர்வீச்சு, ஒளிமின்விளைவு, எக்ஸ் கதிர்களில் ஏற்படும் காம்டன் விளைவு (Compton effect) போன்றவை ஆற்றலுக்கு துகள் பண்பு இருப்பதைத் தெளிவாய்க் காட்டுகின்றன. மேலும், குறுக்கீட்டு விளைவு (interference), விளிம்பு விளைவு (diffraction), ஒளிவிலகல் (refraction), தளவிளைவு (polarisation) போன்றவை ஆற்றலுக்கு, அலைப்பண்பு உண்டென்று காட்டுகின்றன. அதனால் சமச்சீரின்படி, ஆற்றலுக்கு இரட்டைப் பண்பு இருப்பதுபோல், பருப்பொருளுக்கும் இரட்டைப் பண்பு இருக்கவேண்டும். அஃதாவது, ஒவ்வொரு பருப்பொருளுக்கும் அதன் உந்தத்திற்கு ஏற்றாற் போல் குறிப்பிட்ட அலை நீளம் உள்ள ஓர் அலை உண்டு ; அதனை நாம் **பருப்பொருள் அலை** (matter wave) எனக்கூறலாம். நுண்ணிம நிலையிலிருக்கும் எலெக்ட்ரான், புரோட்டான், நியூட்ரான் போன்ற பல

அடிப்படைத்துகள்களும் அலைப்பண்பு பெற்றிருக்க வேண்டும். இதனை அடிப்படையாய் வைத்து ஒரு வாய்பாட்டை அவர் வெளியிட்டார். அதுவே சிறப்பு வாய்ந்த **டி பிராலி வாய்பாடு** ஆகும். அதனைச் சிலவரிகளில் இங்கு நாம் தருவிக்கலாம். ஒளி ஆற்றலில் போட்டான்கள் உள்ளன. ஒவ்வொரு போட்டானின் ஆற்றல்,

$$E = h\nu \quad \dots \quad (4.1)$$

இதில் ν என்பது அதிர்வெண். இங்கு ஆற்றலின் அலைப்பண்பு பயன்படுத்தப்பட்டுள்ளது. ஐன்ஸ்டைனின் நிறை–ஆற்றல் சமன்பாட்டின்படி,

$$E = mc^2 \quad \dots \quad (4.2)$$

இதில் 'c' என்பது ஒளியானது வெற்றிடத்தில் செல்லும் திசைவேகமாகும். இங்கு ஆற்றலின் துகள் பண்பு பயன்படுத்தப்பட்டுள்ளது.

சமன்பாடு (4.1) லும், (4.2) லும் இடப்பக்கம் சமம்.

$$\therefore h\nu = mc^2$$

மேலும், பருப்பொருளான போட்டானின் உந்தம் $p = mc$

$$\therefore pc = h\,\nu = h\frac{c}{\lambda}$$

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

(அல்லது)

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad \dots \quad (4.3)$$

இங்கு λ என்பது அலை நீளம்.

மேற்கூறப்பட்ட சமன்பாடு (4.3) டி பிராலியின் பருப்பொருள் அலைச் சமன்பாடு (matter wave equation) ஆகும். இந்தச் சமன்பாட்டைப் பயன்படுத்தி நியூக்ளியான்கள், எலெக்ட்ரான்கள் போன்ற பருப்பொருள்களுடன் கூடிய அலை நீளத்தைக் கணக்கிடலாம். டி பிராலியின் கருத்திற்குச் சாதகமான சோதனை முடிவுகள் 1927 இல் டேவிஸ்ஸன், ஜெர்மர் (Davison and Germer) என்போரால் பெறப்பட்டன. ஓர் எலெக்ட்ரான் கதிரை நிக்கல் படிகத்திலிருந்து பிரதிபலிக்க, அஃது எக்ஸ் கதிரைப் போல் விளிம்பு விளைவைக் காண்பித்ததென்றும், எக்ஸ்கதிருக்குப் பிராக் (Bragg) வருவித்த சமன்பாட்டைக் கொண்டு எலெக்ட்ரானின் அலைநீளத்தைக் கணித்தால், அது டி பிராலி அலை நீளத்திற்குச் சமமாய் வருகிறதென்றும் அவர்கள் காண்பித்தனர். மேலும், 1928 ஆம் ஆண்டு ஜி.பி. தாம்சனுடைய (G.P.Thomson) சோதனையில் மெல்லிய தங்கத்தாள்மீது விழும் எலெக்ட்ரான்கள், எக்ஸ் கதிர்களைப் போலவே விளிம்பு விளைவைக் காட்டின. சிதறலடைந்த எலெக்ட்ரான்களின் படம் பொதுமைய வளையங்களாயிருந்தன. இவ்வளையங்களின் ஆரத்தையும் உலோகத்தாளுக்கும், விளிம்பு விளைவு வளையங்கள்

உள்ள ஒளிப்படத்தகடுக்கும் இடையே உள்ள தூரத்தையும் அளந்து, அவற்றின் மூலம் விளிம்பு விளைவுக் கோணம் 'θ' வைக் கணக்கிடலாம். தங்கத்தின் அணிக்கோவைத் தளஇடைத்தூரம் 'd' யின் மதிப்பினை எக்ஸ் கதிர் சோதனைகளிலிருந்து அறியலாம். அதனால் $d \sin\theta = n\lambda$ என்ற சமன்பாட்டில் d, θ ஆகியவற்றின் மதிப்புகளை இட, அலைநீளமான λ வின் மதிப்பினைக் கண்டுபிடிக்கலாம். இச்சோதனையின் மூலம் வந்த அலைநீள மதிப்பும், டி பிராலியின் சமன்பாட்டு மூலம் வந்த அலைநீள மதிப்பும், சமமாயிருந்தன. இதற்காகவே 1937 ஆம் ஆண்டு ஜி.பி.தாம்சன், டேவிஸ்சன் ஆகியோருக்கு நோபல் பரிசு கொடுக்கப்பட்டது.

4.3.2 ஷ்ரோடிங்கரின் அலைச்சமன்பாடு (Schroedinger's wave equation)

ஷ்ரோடிங்கரின் அலைச்சமன்பாடு கவள எந்திரவியலில் ஓர் அடிப்படைச் சமன்பாடாகும். 1926 இல் ஷ்ரோடிங்கர், பருப்பொருளின் இரட்டைப்பண்பினை விளக்க ஒரு கணக்கியல் கொள்கையை (mathematical theory) உருவாக்கினார். அதில் டிபிராலியின் பருப்பொருள் அலைநீளச்சமன்பாட்டை மிகப்பழைய கொள்கையின் அலைச் சமன்பாட்டுடன் இணைத்து **'ஷ்ரோடிங்கரின் அலைச்சமன்பாடு'** என்ற சமன்பாட்டைத்தருவித்தார். அவரது சமன்பாட்டின் மூலம் அணுவில் உள்ள எலெக்ட்ரான்களின் ஆற்றலில் எங்ஙனம் கவள நிலைகள் உருவாகின்றன என்பது தெளிவாய் விளக்கப்பட்டது. குறிப்பாய் நுண்ணிமப் பொருள்களின் (microscopic objects) செயல்நிலைகளைத் தெரிந்து கொள்ள ஒருகருவியாக இச்சமன்பாடு இன்றும் பயன்படுகிறது. ஷ்ரோடிங்கரின் கொள்கை சார்ந்த எந்திரவியலை **'அலை எந்திரவியல்'** (wave mechanics) என்று பெயரிட்டனர். கவள எந்திரவியலின் வளர்ச்சியில் அலை எந்திரவியல் முதற்படியாகும். இனி ஷ்ரோடிங்கரின் அலைச்சமன்பாட்டைத் தருவிப்போம்.

மிகப்பழைய கொள்கையில் அலைச்சமன்பாடு,

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad \text{.. (ஒற்றைப் பரிமாணத்தில்)} \qquad \text{.. (4.4)}$$

என இருக்கும். இதில் 'y' என்பது 'x' திசையில் செல்லும் ஓர் அலையின் இடப்பெயர்ச்சியையும் 't' என்பது நேரத்தையும் குறிக்கும் ; 'v' என்பது அலையின் திசைவேகமாகும். இஃது ஒளி அலைகளுக்கும், ஒலிஅலைகளுக்கும், பொருந்தும். இச் சமன்பாட்டின் பொதுவான தீர்வைப் பின்வருமாறு எழுதலாம்.

$$y(x, t) = A e^{-i\omega(t - x/v)} \qquad \text{... (4.5)}$$

அஃதாவது, $y(x, t) = A \cos \omega\left(t - \frac{x}{v}\right) - i A \sin \omega\left(t - \frac{x}{v}\right)$

இதில் $'\omega' = 2\pi f$; அதனைக் கோண அதிர்வெண் என்றும் கூறுவர். ஒரு நீட்சியடைந்தக் கம்பியில் அதிர்வுகள் ஏற்படும்போது 'y' என்பது மெய்யான கணியமாகும். அதன் அளவை நாம் துல்லியமாய் அளக்கலாம். சமன்பாடு (4.5) இன் மெய்யான பகுதியை எடுத்துக்கொண்டு கற்பனைப் பகுதியை விட்டுவிடலாம். ஆனால்,

புரோட்டான், எலெக்ட்ரான் போன்ற நுண் துகள்களுக்குச் சமன்பாடு (4.5) ஐ முழுவதும் எடுத்துக்கொள்ள வேண்டும். அதனால், இடப்பெயர்ச்சி ஒருசிக்கல் (complex) கணியமாகிவிடும். இந்தச் சிக்கல் இடப்பெயர்ச்சிக் கணியத்திற்கு **'அலைச்சார்பு** (wave function), **Ψ (x,t)'** என்று ஷ்ரோடிங்கர் பெயரிட்டார். அதன்படி அலைச்சார்பினை அளக்கமுடியாது. பருப்பொருள் அலையை, அலைச்சார்பு மூலம் குறிப்பிடலாம். மேலும், அலைசார்பு, ஓர்அணு அமைப்பிலுள்ள ஒருதுகளின் நிலையைக் கணிக்கப்பயன்படும். ஒரு கம்பியிலுள்ள அதிர்வுகளை இடப்பெயர்ச்சி 'y' கணிப்பது போல அல்லது மின்புல வேறுபாட்டை மின்புலச் செறிவு 'E' கணிப்பது போல இங்குப் பருப்பொருள் அலையில் ஏற்படும் அலைவேறுபாட்டை Ψ (x,t) அளக்கிறது. அதனால், அலைச்சார்பு துகளையும் அதனுடன் கூடிய அலையையும் புள்ளியியல் முறையில் இணைக்கிறது. **'அஃது ஒரு துகள் எந்த இடத்தில் இருக்கும் என்பதைக் கூறுமே ஒழிய, இந்த இடத்தில்தான் இருக்கும் என்று உறுதியிட்டுக் கூறாது.'** அலைச்சார்பினை ஒருதுகளின் இருப்பிடத்தைக் காண உதவும் **நிகழ்தகவு வீச்சு** (Probability amplitude) எனக் கூறலாம். ஒருகுறிப்பிட்ட அளவு பருமனான 'dτ' வில் ஒருதுகளைக் காண்பதற்குரிய நிகழ் தகவு,

$$p(\vec{r})\,d\tau = \left|\Psi^*\Psi\right| d\tau = |\Psi(r,t)|^2\,d\tau$$

ஷ்ரோடிங்கர் அலைச் சார்பினைப் பின்வருமாறு எழுதலாம்.

$$\Psi(x,t) = A\,e^{-i\omega(t - x/v)} = A\,e^{-2\pi i(\nu t - x\nu/v)}$$

$$= A\,e^{2\pi i(\nu t - x/\lambda)}$$

ஒருபோட்டானின் ஆற்றல், $'E' = h\nu \therefore \nu = \frac{E}{h}$

அதேபோல் போட்டானுடன் கூடிய அலையின் அலைநீளம், $\lambda = \frac{h}{p}$. மேலும் $\hbar = h/2\pi$

ν, λ ஆகியவற்றின் மதிப்புகளை அலைச்சார்பிற்கானத் தீர்வில் இட

$$\Psi(x,t) = A\,e^{-2\pi i(Et/h - xp/h)}$$

$$= A\,e^{-i/\hbar\,(Et - px)}$$

$$\frac{\partial\Psi}{\partial x} = \frac{ip}{\hbar} A\,e^{-i/\hbar\,(Et - px)}$$

$$\therefore \left(\frac{\hbar}{i}\frac{\partial}{\partial x}\right)\Psi = p\,\Psi \qquad (4.6)$$

மேலும்,
$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = -\left(\frac{p^2}{\hbar^2}\right)\Psi$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{-Ei}{\hbar} A e^{-i/\hbar (Et - px)}$$

$$\left(-\frac{\hbar}{i}\frac{\partial}{\partial t}\right)\Psi = E\Psi \quad \ldots (4.7)$$

ஒரு துகளின் மொத்த ஆற்றல்

$$E = \frac{1}{2} mv^2 + V = \frac{p^2}{2m} + V \quad \ldots (4.8)$$

இதில் 'V' என்பது நிலைஆற்றலைக் குறிக்கும்.

சமன்பாடுகள் (4.6), (4.7) ஆகியவற்றைச் சமன்பாடு (4.8)இல் பயன்படுத்த,

$$\left(-\frac{\hbar}{i}\frac{\partial}{\partial t}\right)\Psi = -\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2} + V\Psi$$

(அல்லது)
$$i\hbar\frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + V\Psi \quad .. (4.9)$$

இதையே முப்பரிமாணத்தில் எழுத,

$$\left(i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\right)\Psi(x, y, z, t) = -\frac{\hbar^2}{2m}\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)\Psi(x, y, z, t) + V\Psi(x, y, z, t)$$

(அல்லது)
$$\boxed{i\hbar\frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{-\hbar^2}{2m}\nabla^2\Psi + V\Psi} \quad .. (4.9\ (அ))$$

இங்கு ∇^2 என்பது லாப்லேஸ் செயலி (Laplacian operator) எனப்படும் ;

$$\nabla^2 \equiv \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right].$$

சமன்பாடுகள் (4.9), (4.9) (அ) ஆகியவை ஷ்ரோடிங்கரின் நேரம் சார்ந்த அலைச்சமன்பாடுகள் (time dependent wave equations) ஆகும். இச்சமன்பாட்டை நிலையான ஆற்றல் நிலைகளுக்கு (stationary energy states) பயன்படுத்தும்போது இச்சமன்பாடு நேரத்தைச் சார்ந்திரா அலைச் சமன்பாடாகி (time independent equation) விடும். நாம் இனி நேரத்தைச் சார்ந்திரா அலைச்சமன்பாட்டைத் தருவிப்போம்.

அலைச்சார்பு, $\Psi(x, t) = \psi(x)\,\phi(t)$ எனப் பிரித்துக்கொள்வோம்.

$$\therefore \Psi(x, t) = A\, e^{i\,px/\hbar}\, e^{-iEt/\hbar} = \psi(x)\,\phi(t) = \psi(x) e^{-iEt/\hbar}$$

$$\frac{\partial^2 \Psi(x, t)}{\partial x^2} = e^{-iEt/\hbar}\,\frac{d^2\psi(x)}{dx^2}$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{iE}{\hbar}\, e^{-iEt/\hbar}\,\psi(x)$$

சமன்பாடு (4.9) இன் படி,

$$i\hbar\frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + V\Psi$$

$\frac{\partial \Psi}{\partial t}, \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2}$ ஆகியவற்றின் மதிப்புகளை மேலேயுள்ள சமன்பாட்டில் இட,

$$i\hbar\left(-\frac{iE}{\hbar}\right) e^{-iEt/\hbar}\,\psi(x) = -\frac{\hbar^2}{2m}\, e^{-iEt/\hbar}\,\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + V\,\psi(x)\, e^{-iEt/\hbar}$$

$$\therefore\; E\,\psi(x) - V\,\psi(x) = \frac{-\hbar^2}{2m}\frac{d^2\psi(x)}{dx^2}$$

$$\boxed{\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E - V)\,\psi(x) = 0} \qquad .. \;(4.10)$$

முப்பரிமாணத்தில் இதனை எழுத,

$$\boxed{\nabla^2\psi + \frac{2m}{\hbar^2}(E - V)\,\psi = 0} \qquad .. \;(4.10\ (அ))$$

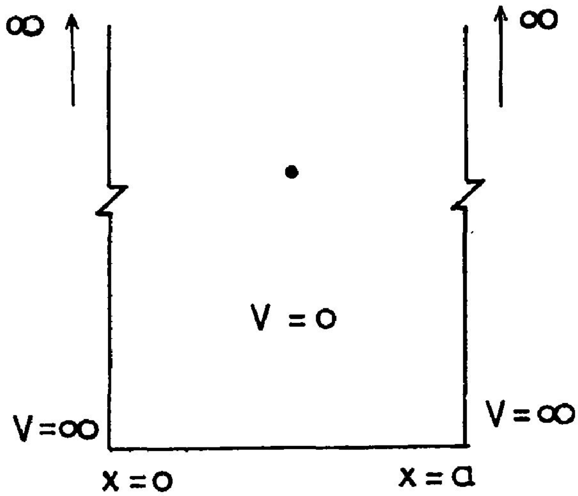
இதில் ψ என்பது x,y,z - ஐ சார்ந்துள்ள சார்பாகும்.

இனி ஷ்ரோடிங்கரின் சமன்பாட்டைப் பயன்படுத்திச் சில மாதிரிகளைப் பார்ப்போம்.

4.3.3 வரையிலி ஆழமுடையதும், குறிப்பிட்ட அளவு அகலமுடையதுமான ஒரு நிலை ஆற்றல் கிணற்றுக்குள் உள்ள ஒருதுகளின் ஆற்றல் மதிப்பினைத் தருவித்தல் (ஒற்றைப் பரிமாணத்தில்)

நிலை ஆற்றல் கிணற்றின் உள்ளே நிலைஆற்றல் சுழியாய் இருப்பதால், அதனுள் துகள் தன்னிச்சையாய் இயங்க முடியும். மேலும், அது கிணற்றுச்சுவருடன் மோதும் போது அதன் இயக்க ஆற்றலில் ஒருமாறுதலும் ஏற்படாது என்று எடுத்துக் கொள்வோம். அதாவது, மோதல்கள் அனைத்தும் மீள்தன்மையுடையன என எடுத்துக்கொள்வோம்.

கிணற்றுச் சுவருக்கு வெளியே நிலை ஆற்றல் $V = \infty$ ஆக இருப்பதால், துகள், கிணற்றுப் பக்கங்கள் வழியே வெளியே தப்பித்துச் செல்ல முடியாது. அதனால் துகளின் இயக்கம் கிணற்றுச் சுவர்களுக்கு இடையே என்றும், மேலும் அதன் இயக்கம் 'x' திசையில் மட்டும் உள்ளது என்றும் எடுத்துக்கொள்வோம்.



படம் 4.1 வரையிலி ஆழமுடையதும், 'a' அலகுகள் அகலமுடையதுமான ஒருநிலை ஆற்றல் கிணற்றில் உள்ள ஒருதுகள்.

எல்லை நிபந்தனைகள் (boundary conditions):

1. $|\psi|^2 = 0 \qquad 0 \geq x \geq a$

எனவே $x = 0$ யில் $\psi = 0$; $x = a$ யிலும் $\psi = 0$.

2. $|\psi|^2 \neq 0 \qquad 0 < x < a$

அதனால், கிணற்றுக்குள் அலைச்சார்பின் மதிப்புச் சுழியில்லாமல் இருக்கும். ஷ்ரோடிங்கரின் சமன்பாட்டின்படி,

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E - V)\psi = 0$$

ஆனால், இங்கு $V = 0$. $\therefore \frac{d^2\psi}{dx^2} + k^2\psi = 0$

இதில் $k^2 = \frac{2mE}{\hbar^2} = \frac{2m}{\hbar^2}\frac{p^2}{2m} = \frac{4\pi^2}{\lambda^2}$

அஃதாவது, $\vec{k}$ என்பது அலைவெக்டாராகும்.

மேற்கண்ட சமன்பாடு இருபடித்தான சீரிசைச் சமன்பாடு ; ஆகையால் அதன் தீர்வைப் பின்வருமாறு எழுதலாம் :

$$\psi = A \sin kx + B \cos kx.$$

எல்லை நிபந்தனைகளை மேற்கண்ட தீர்வில் இடுவோம்.

$$x = 0 \text{ எனில், } \psi_{x=0} = 0 = A \sin 0 + B$$

$$\therefore B = 0$$

$$x = a \text{ எனில், } \psi_{x=a} = 0 = A \sin ka$$

$$\therefore ka = n\pi \text{ (அல்லது) } k = \frac{n\pi}{a}$$

இதில் 'n' என்பது கவள எண் ஆகும். அஃது ஓர் இயல் எண்ணாகவே இருக்கும். ஆனால், $k^2 = \frac{2mE}{\hbar^2}$.

$$\text{எனவே } k^2 = \frac{2mE}{\hbar^2} = \frac{n^2\pi^2}{a^2}$$

$$\text{(அல்லது) } E_n = \frac{n^2\pi^2\hbar^2}{2ma^2} = \frac{n^2h^2}{8ma^2} \tag{4.11}$$

$$\psi_n = A \sin \frac{n\pi x}{a} \tag{4.12}$$

இனி A–இன் மதிப்பினைக் கண்டுபிடிப்போம். துகள் கிணற்றுக்குள்தான் இருக்கமுடியும். அதனால்,

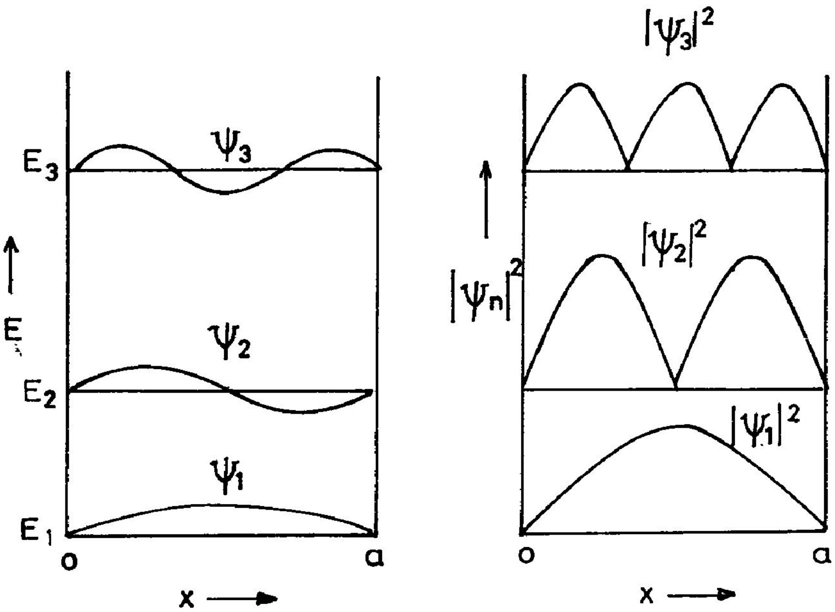
$$\int_0^a |\psi_n|^2 dx = 1 \text{ (அல்லது) } A^2 \int_0^a \sin^2 \frac{n\pi x}{a} dx = 1$$

$$A^2 \int_0^a \frac{\left(1 - \cos \frac{2n\pi x}{a}\right)}{2} dx = 1$$

$$\frac{A^2}{2}\left[x - \frac{a}{2\pi n} \sin \frac{2\pi n x}{a}\right]_0^a = 1$$

$$\frac{A^2 a}{2} = 1. \text{ எனவே } A = \sqrt{2/a}$$

$$\therefore \psi_n = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \tag{4.13}$$



படம் 4.2 வெவ்வேறு ஆற்றல் மட்டங்களில் அலைச் சார்பும், துகள் அங்கு இருப்பதற்குரிய நிகழ்தகவும்.

சமன்பாடு (4.11) இன்படி ஆற்றல் மதிப்புகள் தொடர்ச்சியாய் இல்லாமல், தனித்தனியாய் உள்ளன. அதனால், துகள் ஒரு குறிப்பிட்ட நேரத்தில் ஒரு குறிப்பிட்ட ஆற்றல் மட்டத்தில் இருந்து அதற்குரிய ஆற்றலைத்தான் கொண்டிருக்கும். மேலே கூறப்பட்ட ஆற்றல் மதிப்புகள் எல்லாம் அனுமதிக்கப்பட்ட ஆற்றல் மதிப்புகள் (allowed values of energy) எனக் கூறுவர். அனுமதிக்கப்பட்ட ஆற்றல் மட்டங்களில் அடிமட்டத்தில் உள்ள ஆற்றல் மட்டமான E_1 – ஐ தரைமட்ட ஆற்றல் என்பர். தரைமட்டத்தில் உள்ள ஆற்றல் $E_1 = \frac{h^2}{8ma^2}$ ஆகும். மேலும் கவள எண் மதிப்புக் கூடக்கூட ஆற்றல் மட்டங்களுக்கு இடையேயான இடைவெளிகள் மிகவும் குறைந்து கொண்டே போகும். படம் 4.2-ல் வெவ்வேறு ஆற்றல் மட்டங்களில் அலைச் சார்பும் துகள் அம்மட்டங்களில் இருப்பதற்குரிய நிகழ்தகவும் கொடுக்கப்பட்டுள்ளன. இதன்படி துகளானது, தரைமட்ட ஆற்றலில் இருக்கும்போது அது பெரும்பாலும் கிணற்றின் நடுப்பகுதியில்தான் அதிக நேரம் இயங்குகிறது என்பதையும், தரைமட்ட ஆற்றலுக்கு மேலே உள்ள ஆற்றல் மட்டத்தில் அத்துகள் பெரும்பாலும் நடுப்பகுதிக்கு வருவதில்லை என்பதையும் அறிந்து கொள்ளலாம். மேற்கண்ட கணக்கையே ‘a’ அலகு பக்கமுடைய ஒரு கனசதுர அமைப்புடைய உலோகத்திற்கு எடுத்துக்கொண்டு, அதிலுள்ள எலெக்ட்ரான் உலோகத்திற்குள் எல்லாத் திசைகளிலும் இயங்குகின்றது என எடுத்துக் கொள்வோம். அதனால், இங்கு மூன்று வகையான n_x, n_y, n_z என்னும் கவள எண்களைப் பயன்படுத்த வேண்டும். இவை மூன்றும் மூன்று அச்சுகளாய x, y, z ஆகியவற்றிற்கு இணையான

திசைகளில் எலெக்ட்ரானின் இயக்கத்தைக் கூறுகளாய்ப் பிரிக்கப்படும்போது கிடைக்கும் இயக்கக் கூறுகளுக்கு உரிய கவள எண்களாகும். எனவே,

$$E_n = \frac{h^2}{8ma^2}\left(n_x^2 + n_y^2 + n_z^2\right) \qquad (4.14)$$

இதில் n_x, n_y, n_z ஆகியவை தம் மதிப்புகளாக 1, 2, 3, ... என்ற தொகுதியிலுள்ள ஏதேனும் ஓர் எண்ணை எடுத்துக் கொள்ளலாம். அதேபோல் அலைச்சார்பும்,

$$\psi_{n_x, n_y, n_z} = \sqrt{\frac{8}{a^3}}\,\sin\frac{n_x \pi x}{a}\,\sin\frac{n_y \pi y}{a}\,\sin\frac{n_z \pi z}{a} \qquad .. \quad (4.15)$$

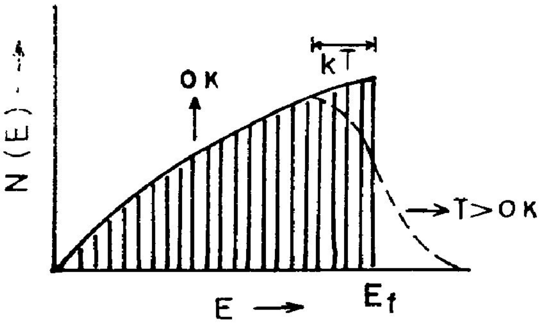
என மாறும். அதனால் உலோகத்திலுள்ள எலெக்ட்ரானின் நிலையை விளக்க n_x, n_y, n_z போன்ற மூன்று கவள எண்கள் தேவைப்படுகின்றன. மேலும் எலெக்ட்ரானின் ஆற்றல் மதிப்பு n_x, n_y, n_z ஆகிய மூன்றின் வர்க்கக் கூட்டுத் தொகையைச் சார்ந்துள்ளது. அதனால் ஒரே ஆற்றலுக்குப்பல அனுமதிக்கப்பட்ட அலைச் சார்புகள் உள்ளன. அஃதாவது,

ψ_{211}, ψ_{121} மற்றும் ψ_{112} ஆகிய அலைச்சார்புகளுக்கு $\frac{6h^2}{8m\,a^2}$ என்னும் ஆற்றல் பொதுவானது. அதனால் ஒரே ஆற்றல் மட்டத்தில் (energy level) பல ஆற்றல்நிலைகள் (energy states) இருக்க வாய்ப்புண்டு. எனினும், ஒவ்வோர் ஆற்றல் நிலைக்கும் ஒவ்வோர் அலைச் சார்புதான் இருக்கமுடியும். குறிப்பாய்த் தரைமட்ட ஆற்றலுக்கு $\left(\frac{3h^2}{8m\,a^2}\right)$,'$\psi_{111}$' என்ற ஒரே அலைச்சார்பு உள்ளதால் அதற்கு ஒரேயொரு ஆற்றல் நிலைதான் உள்ளது.

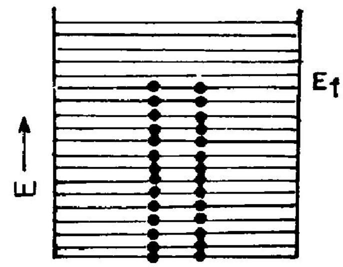
4.3.4 உலோகங்களில் எலெக்ட்ரான்களின் ஆற்றல்

சமன்பாடு (4.14) இல் கொடுக்கப்பட்ட ஆற்றல் மதிப்புகள் அனைத்தும் ஓர் உலோகத்திலுள்ள இணைதிற எலெக்ட்ரான்களுக்கு அனுமதிக்கப்பட்டவையாகும். ஆனால், இது நமக்கு முக்கியமன்று. ஓர் உலோகத்தில் உள்ள இணைதிற எலெக்ட்ரான்கள் எந்த ஆற்றல்களைப் பெற்றிருக்கும் என்பதே மிக முக்கியமாகும்.

ஆற்றல் மதிப்பு உயர உயர, ஆற்றல் மட்டங்களில் ஆற்றல் நிலைகளின் அடர்த்தியும் உயரும். ஆற்றல் மதிப்பிற்கும், ஒரு குறிப்பிட்ட அகலமான ஆற்றல் மட்டத்தில் உள்ள ஆற்றல் நிலைகளின் அடர்த்திக்கும் இடையே ஒரு வரைபடத்தை வரைந்தால் அது நமக்குப்படம் 4.3 (அ) வில் காட்டியபடி இருக்கும்.



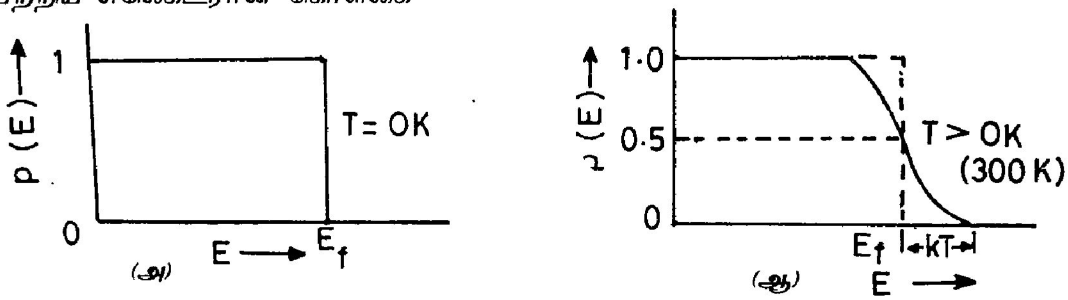
(அ)



(ஆ)

படம் 4.3 (அ) ஆற்றல் நிலைகளின் பகிர்வு
(ஆ) சுழி கெல்வின் வெப்பநிலையில் ஒரு நிலை ஆற்றல் கிணற்றில் எவ்வாறு எலெக்ட்ரான்கள் ஆற்றல் நிலைகளில் நிரம்பியுள்ளன என்பதனைக்காட்டும் படம்.

ஆற்றல் மதிப்பு உயர உயர ஆற்றல் நிலைகளின் பகிர்வும் பரவளையப்படி உயரும். இணைதிற எலெக்ட்ரான்கள், காலியாயுள்ள ஆற்றல்நிலைகளின் அடிமட்டத்திலிருந்து நிரம்பிக்கொண்டே வரும். எனினும், எலெக்ட்ரான் வாயுவில் இருக்கும் அனைத்து எலெக்ட்ரான்களிடையே ஊடாடல் அல்லது இடைவினைகள் நிகழ்வதால் அவற்றை ஒரு தனி அமைப்பாய்க் கருதிப் பௌலியின் தவிர்க்கைத் தத்துவத்தையும் அதில் சேர்க்க வேண்டும். அதன்படி ஓர் ஆற்றல் நிலையில் எதிரெதிர் சுழற்சிகளைக் கொண்ட இரு எலெக்ட்ரான்கள் மட்டுமே இருக்க முடியும். அஃதாவது, ஓர் ஆற்றல்நிலையில் உள்ள இரு எலெக்ட்ரான்களில் ஒன்றன் சுழற்சி மேல்நோக்கியும் (spin up), மற்றொன்றின் சுழற்சி கீழ்நோக்கியும் (spin down) இருக்கும். இதன்படி சுழி கெல்வின் வெப்பநிலையில் ஒரு பெரும ஆற்றல் மட்டம்வரை ஆற்றல் நிலைகள் நிரம்பியிருக்கும். அந்த பெரும ஆற்றல் மட்டமே **ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டம்** (Fermi energy level) என அழைக்கப்படுகிறது. சுழிகெல்வின் வெப்பநிலையில் ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டத்திற்குமேல் உள்ள ஆற்றல் நிலைகள் அனைத்தும் காலியாய் இருக்கும். இதனையே படம் 4.3 (ஆ) வில் காட்டபபட்டுள்ளது. ஓர்உலோகத்தின் ஃபெர்மி ஆற்றல் அதிலுள்ள கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கையைப் பொறுத்துள்ளது. இதனை ஃபெர்மி பகிர்வு வரை (Fermi distribution curve) மூலம் குறிப்பிடலாம். ஃபெர்மி பகிர்வு வரை ஒரு குறிப்பிட்ட வெப்பநிலையில் ஓர் ஆற்றல்நிலை நிரம்பியுள்ளதற்குரிய நிகழ்தகவை (probability) அளிக்க வல்லது.



படம் 4.4 ஃபெர்மி பகிர்வு வரை

(அ) T = 0 K

(ஆ) T > 0 K (அறை வெப்பநிலையில்)

படம் 4.4 (அ)வில் காட்டியவாறு சுழிகெல்வின் வெப்பநிலையில் ஃபெர்மி ஆற்றல் வரையுள்ள ஆற்றல் மட்டங்களில் ஆற்றல்நிலைகள் நிரம்பியுள்ளதற்குரிய நிகழ்தகவு ஒன்றாகும். ஆனால், அதேசமயம் ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டத்திற்கு மேலேயுள்ள ஆற்றல் நிலைகளில் அவை நிரம்பியதற்குரிய நிகழ்தகவு சுழியாகும். வெப்பநிலை கூடும்போது ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டத்திற்கு மேலேயுள்ள சில ஆற்றல் நிலைகளும் நிரம்பி இருக்கும் என்பதைப் படம் 4.4 (ஆ) காட்டுகிறது. வெப்ப இயக்கவியலின் (thermodynamics) படி வெப்பநிலை T கெல்வினில் ஒரு பொருளில் உள்ள ஒருதுகள் உட்கிரகிக்கும் வெப்ப ஆற்றலின் சராசரி kT என இருக்கும். அதனால் பெரும ஆற்றல் மட்டமான ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டத்திலிருந்து kT அளவு இடைவெளியில் உள்ள எலெக்ட்ரான்கள் மட்டும் வெப்ப ஆற்றலை உட்கொண்டு ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டத்திற்கு மேலுள்ள ஆற்றல்நிலைகளை அடைகின்றன. அறை வெப்பநிலையில்,

$$kT \approx \frac{1}{100} E_{max} = \frac{1}{100} E_f$$

அதனால், மொத்த எலெக்ட்ரான்களில் ஒரு விழுக்காடு மதிப்புள்ள எலெக்ட்ரான்கள் மட்டுமே வெப்ப ஆற்றலை உட்கொண்டு ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டத்திற்கு 'E_f' மேலுள்ள ஆற்றல்நிலைகளை அடைகின்றன.

ஃபெர்மி பகிர்வுக் கோவையைப் பின்வருமாறு எழுதலாம் :

$$p(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - E_f)/kT}} \qquad \dots (4.16)$$

இதில் 'p(E)' என்பது ஓர் எலெக்ட்ரான் 'E' என்ற ஆற்றல் மட்டத்தில் இருப்பதற்குரிய நிகழ்தகவைக் குறிக்கிறது.

$E \leq E_f$ என இருக்கும்போது, சுழிகெல்வின் வெப்பநிலையில் $p(E) = 1$.

$E > E_f$ என உள்ள ஆற்றல் மட்டங்களில், சுழிகெல்வின் வெப்பநிலையில் $p(E) = 0$. அதனால், சுழிகெல்வின் வெப்பநிலையில் ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டம், நிரம்பிய ஆற்றல் மட்டங்களையும் காலியாக உள்ள ஆற்றல் மட்டங்களையும் பிரிக்கும் ஓர் எல்லைக் கோடாயுள்ளது.

ஆற்றல் நிலைகளின் அடர்த்தி (density of states) ‘G(E) dE’ என்பது ஓரலகுபருமன் உள்ள திண்மத்தில் E மற்றும் E + dE ஆகிய ஆற்றல்களுக்கு இடையே இருக்கக்கூடிய மொத்த ஆற்றல் நிலைகளின் எண்ணிக்கையாகும்.

$$\text{அஃதாவது, } G(E)\, dE = \frac{\text{ஒரு திண்மத்தில் } E \text{ மற்றும் } E + dE \text{ ஆகிய ஆற்றல்களுக்கு இடையே உள்ள ஆற்றல்நிலைகளின் எண்ணிக்கை}}{\text{அத்திண்மத்தின் பருமன்}}$$

ஒரு குறிப்பிட்ட ஆற்றல் மட்டத்தில் உள்ள ஆற்றல்நிலைகளின் எண்ணிக்கை, $n = \left(n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 \right)^{1/2}$ என்னும் சமன்பாட்டில் ஒரு குறிப்பிட்ட ‘n’ இன் மதிப்பு வர n_x, n_y, n_z ஆகிய மூன்று கவள எண்களின் பல்வேறு மதிப்புகளின் தொகுப்பு எத்தனை என்பதனைச் சார்ந்துள்ளது. அதனால் ஆற்றல் நிலைகளின் அடர்த்தியைக்காண n_x, n_y, n_z ஆகிய அச்சுகளால் ஆன ஒரு வெளி (space) யில் ஆரம் ‘n’ஐக் கொண்ட ஒரு கோளத்தை வரைந்து கொள்வோம். அக்கோளத்தின்மேல் காணும் ஆற்றல் ‘E’ எனக்கொள்வோம். இக்கோளத்திற்குக்குள்ளும், வெளியிலும் பல ஆற்றல் கோளக் கூடுகள் இருப்பதாகக் கொள்வோம். ஒவ்வொரு கூடும் ஒருகுறிப்பிட்ட ஆரத்தையும், ஆற்றலையும் கொண்டிருக்கும். n_x, n_y, n_z ஆகியவைகளில் ஒன்றன் மதிப்பு மாறினாலும், ‘n’ன் மதிப்பு மாற, அதனால் ஆற்றல் மதிப்பும் மாறும். தற்போது ஆரம் ‘n’இல் இருந்து Δn அளவு தூரத்தில் ஆரம் $(n + \Delta n)$ ஐக் கொண்ட ஒரு கூடு உள்ளது என்றும், அதன் ஆற்றல் $E + dE$ எனவும் கொள்வோம். n- வெளியில் உள்ள கோளத்தின் மொத்த பருமனில், 1/8 பாகத்தில் மட்டும் n_x, n_y, n_z என்ற கவள எண்கள் அனைத்தும் நேர்க்குறியை உடையதாக இருக்கும். எனவே E மற்றும் $E + dE$ ஆற்றல் மட்டங்களுக்கு இடையே உள்ள ஆற்றல் நிலைகளின் எண்ணிக்கையைக் கணக்கிடும்போது n_x, n_y, n_z ஆகியவை நேர்க்குறியைக் கொண்டுள்ள கோளப்பகுதியை மட்டும் எடுத்துக் கொள்ளவேண்டும். ஆகையால் E மற்றும் $E + dE$ ஆற்றல் மட்டங்களுக்கு இடையே உள்ள ஆற்றல் நிலைகளின் எண்ணிக்கை ΔG யைப் பின்வருமாறு எழுதலாம்.

ΔG = கோளமையத்திலிருந்து ‘n’ தொலைவில் Δn அளவு தடிமனுள்ள கூட்டின்கண் உள்ள மொத்த ஆற்றல் நிலைகள்.

அஃதாவது,
$$\Delta G = \frac{1}{8} \times 4\pi\, n^2\, \Delta n = \frac{\pi\, n^2\, \Delta n}{2}$$

மேலும்
$$E = \frac{n^2 h^2}{8ma^2} \qquad (4.11)$$

இதை வகையீடு (differentiation) செய்ய

$$dE = 2n\, dn \frac{h^2}{8ma^2}$$

$$\therefore ndn = \frac{8ma^2}{2h^2} dE$$

மேலும் சமன்பாடு (4.11) இன் மூலம்

$$n = \frac{E^{1/2} (8ma^2)^{1/2}}{h}$$

$$\therefore \Delta G = \frac{1}{8} \times 4\pi \left(\frac{E^{1/2} (8ma^2)^{1/2}}{h} \right) \frac{8ma^2}{2h^2} dE$$

$$= \frac{\pi}{2} \frac{(8m)^{3/2}}{2h^3} a^3 E^{1/2} dE$$

இதில் $a^3 = V =$ திண்மத்தின் பருமன்.

எனவே ஓரலகு பருமனில் Eக்கும் $E + dE$ க்கும் இடையே உள்ள ஆற்றல் நிலைகளின் எண்ணிக்கை,

$$\frac{\Delta G}{V} = G(E)\, dE = \frac{\pi}{4h^3} (8m)^{3/2} E^{1/2} dE$$

பௌலியின் தவிர்க்கை தத்துவத்தின்படி ஒவ்வொரு ஆற்றல் நிலையிலும் பெரும மதிப்பாக 2 எலெக்ட்ரான்களை அமர்த்த முடியும். எனவே E க்கும் $E + dE$ க்கும் இடையே உள்ள ஆற்றல் நிலைகள் அனைத்தும் எலெக்ட்ரான்களால் நிரம்பியிருப்பதாகக் கொள்வோம். எனவே ஓரலகுபருமனில் E மற்றும் $E + dE$ என்ற ஆற்றல் மட்டங்களுக்கு இடையே உள்ள ஆற்றல் நிலைகளில் உள்ள எலெக்ட்ரான்களின் மொத்த எண்ணிக்கை,

$$dN = g(E)\, dE = 2G\, (E)\, dE = 2. \frac{\pi}{4h^3} (8m)^{3/2} E^{1/2} dE$$

$$\therefore dN = \frac{4\pi}{h^3} (2m)^{3/2} E^{1/2} dE \qquad (4.17)$$

பொதுவாக எல்லா ஆற்றல் நிலைகளும் எலெக்ட்ரான்களால் நிரம்பியிராது. எனவே,

$$dN = N(E)\, dE = p(E)\, g(E)\, dE$$

இங்கு p(E) என்பது ஓர் எலெக்ட்ரான் 'E' என்ற ஆற்றல் மட்டத்தில் இருப்பதற்கான நிகழ்தகவு ஆகும்.

இப்போது நாம் உலோகங்களில் உள்ள எலெக்ட்ரான்களின் அடர்த்தியைச் சுழிகெல்வின் வெப்பநிலையில் காணப்போகிறோம். சுழிகெல்வின் வெப்பநிலையில் $p(E) = 1$; மேலும் ஆற்றல் நிலைகள் E_f என்னும் ஆற்றல்மட்டம் வரை நிரம்பி இருக்கும்.

$$\therefore \int N(E)\,dE = N = \int_0^{E_f} g(E)\,dE$$

g(E) dE இன் மதிப்பை மேற்காணும் தொகையத்தில் (integral) இட,

ஓரலகு பருமனில் உள்ள எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை 'N' $= \int_0^{E_f} \frac{4\pi}{h^3}(2m)^{3/2} E^{1/2}\,dE$

தொகையத்தைத் தீர்வு செய்ய,

$$N = \frac{4\pi}{h^3}(2m)^{3/2}\frac{2}{3}E_f^{3/2}$$

(அல்லது) $$N = \frac{8\pi}{3}\left[\frac{2mE_f}{h^2}\right]^{3/2} \quad \text{.. (4.18)}$$

மேலும், $$E_f = \left(\frac{h^2}{2m}\right)\left(\frac{3N}{8\pi}\right)^{2/3} \quad \text{(4.18 (அ))}$$

அதனால் ஓர் உலோகத்தின் ஃபெர்மி ஆற்றல் அதிலுள்ள எலெக்ட்ரான்களின் அடர்த்தியைப் பொறுத்துள்ளது. மேலும், பின்வரும் சமன்பாட்டின்படி வெப்பநிலை உயர, ஃபெர்மி ஆற்றல் மதிப்பும் சிறிது குறைகிறது.

$$E_f = E_{fo}\left[1 - \frac{\pi^2}{12}\frac{(kT)^2}{E_{fo}^2}\right]^*$$

மேலும், $E_{fo} = kT_f$

இங்கு E_{fo} என்பது சுழிகெல்வின் வெப்பநிலையில் ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டமாகும். T_f என்பது ஃபெர்மி வெப்பநிலை. அட்டவணை 4.1இல் பல உலோகங்களில் எலெக்ட்ரான்களின் அடர்த்தியும், சுழிகெல்வின் வெப்பநிலையில் ஃபெர்மி ஆற்றலும், ஃபெர்மி வெப்பநிலையும் கொடுக்கப்பட்டுள்ளன.

*இச்சமன்பாடு இந்நூலின் ஐந்தாவது பகுதியான திண்மங்களின் வெப்பப்பண்புகளில் தெளிவாய் விளக்கப்பட்டுள்ளது.

அட்டவணை 4.1

உலோகங்களில் ஃபெர்மி ஆற்றலும், எலெக்ட்ரான்களின் அடர்த்தியும்.

உலோகம்		ஒருகன மீட்டர் பருமனில் உள்ள எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை 'N' $\times 10^{28}$	சுழிகெல்வின் வெப்பநிலையில் ஃபெர்மி ஆற்றல் 'E_{fo}' (எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டில்)	ஃபெர்மி வெப்பநிலை 'T_f' (கெல்வினில்) $\times 10^4$
சீசியம்	(Cs)	0.85	1.53	1.8
பொட்டாசியம்	(K)	1.30	2.14	2.5
சோடியம்	(Na)	2.50	3.12	3.6
லித்தியம்	(Li)	4.60	4.72	5.5
வெள்ளி	(Ag)	5.80	5.51	6.4
தங்கம்	(Au)	5.90	5.54	6.4
தாமிரம்	(Cu)	8.50	7.04	8.2

இங்ஙனம் கவளக் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான் கொள்கையின்படி கணக்கிடப்பட்ட எலெக்ட்ரான் அடர்த்தியைப் பயன்படுத்திப் பல உலோகங்களின் வெப்பங்கடத்துந்திறன், மின்கடத்துந்திறன் ஆகியவற்றின் மதிப்புகளைக் கணக்கிடும்போது, அம்மதிப்புகளும் சோதனைகளின் மூலம் பெற்ற மதிப்புக்களும் ஒன்றாகவே இருந்தன. இதுபற்றி இனிவரும் அத்தியாயங்களில் காணப்போகிறோம். எனினும் கவளக்கட்டற்ற எலெக்ட்ரான் கொள்கையிலும் சிலகுறைபாடுகளும் இருக்கின்றன. அஃதாவது, கவளக் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான் கொள்கைப்படி எலெக்ட்ரானிய தன்வெப்ப ஏற்புதிறன்

$$C_{V(\text{எலெக்ட்ரான்})} = \frac{\pi^2}{2} R\ n \frac{T}{T_f} = \gamma T$$

மிகக் குறைந்த வெப்பநிலைகளில் டிபைக் கொள்கைப்படி

$$C_{V(\text{அணிக்கோவை})} = \propto T^3$$

அதனால், மிகக்குறைந்த வெப்ப நிலைகளில் மொத்த பருமன்மாறாத் தன்வெப்ப ஏற்புத்திறனைப் பின்வருமாறு எழுதலாம் :

$$C_V = \propto T^3 + \gamma T$$

$$\frac{C_V}{T} = \propto T^2 + \gamma \quad .. \quad (4.19)$$

நாம் $\frac{C_V}{T}$ க்கும் T^2 க்கும் இடையே ஒரு வரை (graph) வரைந்தால் நமக்கு ஒரு நேர்கோடு கிடைக்கும். அக்கோடு $\frac{C_V}{T}$ உள்ள அச்சில் வெட்டும் புள்ளியிலிருந்து ஆதி (origin) வரை உள்ள தூரம் 'γ' வின் மதிப்பினையும், அக்கோட்டின் சாய்வு (slope) '∝' வின் மதிப்பையும் தரும். எலெக்ட்ரானிய தன்வெப்ப ஏற்புத் திறன் வெப்பநிலைக்கு நேர்விகிதத்தில் இருந்தாலும், கணக்கீடு முறைகளில் கண்டுபிடித்த '∝' வின் மதிப்புச் சோதனை முறைகளில் கண்டுபிடித்த மதிப்பிலிருந்து வேறுபட்டுள்ளது. இதற்குக் காரணம் கடத்து எலெக்ட்ரான்களின் அடர்த்தியைச் சரியாய்க் கவளக் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான் கொள்கை தரவில்லை. ஆனால், மண்டலக் கொள்கையைப் (zone theory) பயன்படுத்தும்போது எலெக்ட்ரானின் நிறை 'm' என இராமல் அதன் செயலுறுநிறை (effective mass) 'm*' ஆக இருக்கும். உதாரணமாய், சோதனைகளில் தாமிரத்திற்கு எலெக்ட்ரானிய பருமன்மாறாத் தன்வெப்ப ஏற்புத்திறன் மதிப்பு கவளக்கட்டற்ற எலெக்ட்ரான் கொள்கையைப் பயன்படுத்திக் கணக்கிடப்பட்ட மதிப்பினை விட 1.5 மடங்கு உயர்ந்திருக்கிறது. அதனால், தாமிரத்திற்கு $\frac{m^*}{m} = 1.5$ என இருக்க வேண்டும். மேலும், ஃபெர்மி ஆற்றல் 7.04 எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டுப் பதிலாய் 4.7 எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு என இருக்க வேண்டும். இங்ஙனம், உலோகப் படிகங்களில் எலெக்ட்ரானின் நிறை அதனுடைய செயலுறுநிறையாயிருக்குமே ஒழியக் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான் நிறையாய் இராது. இவ்விதக் குறைபாடுகளைக் களையவே மண்டலக் கொள்கை தோற்றுவிக்கப்பட்டது.

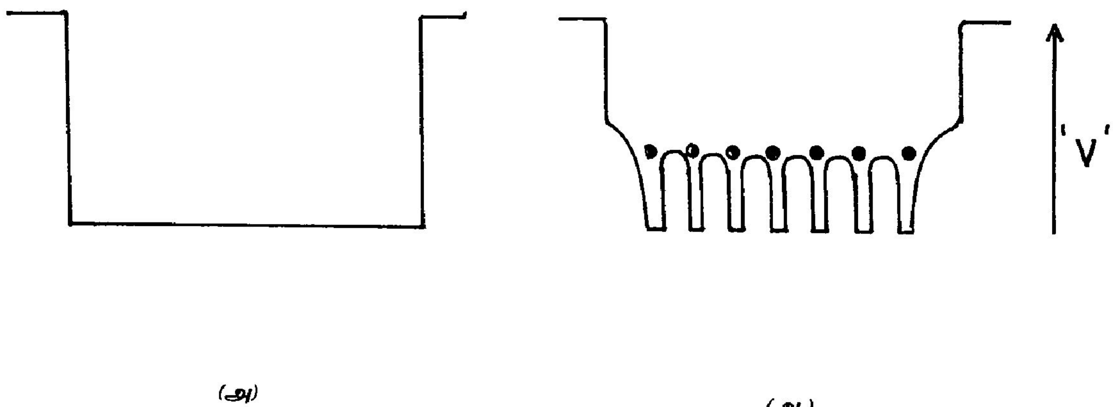
4.4 மண்டலக் கொள்கை (Zone Theory)

திண்மப் பொருள்களின் மண்டலக் கொள்கையின்மூலம் திண்மப் பொருள்களை கடத்திகள், குறைகடத்திகள், அரிதிற் கடத்திகள் என எளிதாய்ப் பிரிக்க முடியும். மேலும், கவளக் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான் கொள்கையில் கண்ட குறைபாடுகளைக் களையவும் மண்டலக் கொள்கை பயன்படுகிறது.

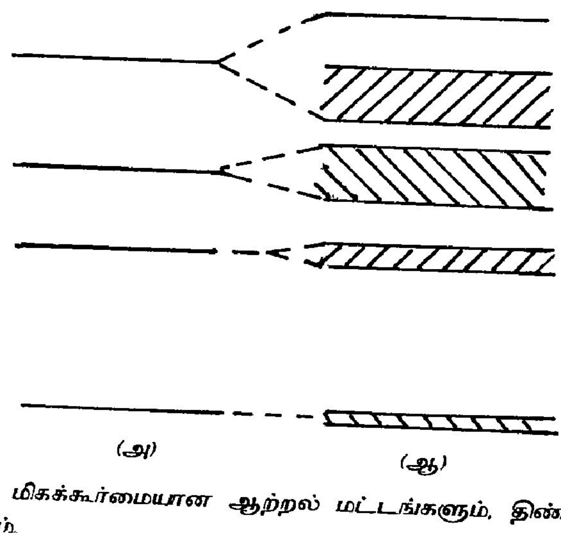
4.4.1 திண்மங்களில் ஆற்றல்பட்டைகள்

இதுவரை நாம் உலோகத்தில் உள்ள சில எலெக்ட்ரான்கள் அவற்றின் அணுக்களிலிருந்து விடுபட்டு உலோகத்தின் ஒருமாறா நிலைஆற்றல் கிணற்றின்கண் தன்னிச்சையாய் இயங்குவதாய்க் கண்டோம். மேலும் அரிதிற் கடத்திகளாய மின்கடத்தாப் பொருள்களில் இவ்விதக் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்கள் இல்லை எனக் கொண்டோம். இவ்விரண்டிற்கும் இடைப்பட்டவகையாய குறைகடத்திகளில் வெப்ப மின்தடைக் குணகம் (temperature coefficient of resistance) நேர்க்குறியாயில்லாமல் எதிர்க்குறியை உடையதாய் இருக்கிறது. இங்ஙனம் பல்வகைப் பட்ட திண்மப் பொருள்கள் இருப்பதற்குரிய காரணத்தை அறிந்துகொள்ள வேண்டுமானால், நெருக்கப் பொதிவு (close packed) உள்ள திண்மத்தில் எலெக்ட்ரான்களுக்கும், நிலையான அயனிகளுக்கும் இடையே நடைபெறும்

இடைவினையை நாம் கருத்திற் கொள்ள வேண்டும். திண்மத்தில் அணு இடைத்தூரம் ஏறத்தாழ அணு ஆரத்தின் மதிப்பில் இருக்கும். அதனால், ஓர் எலெக்ட்ரானின் நிலை ஆற்றல் படம் 4.5(ஆ) வில் காட்டியபடி மாறும். அஃதாவது, ஓர் எலெக்ட்ரான் நேர் மின்னூட்டம் கொண்ட அயனியை நெருங்கும்போது அதன் நிலைஆற்றல் திடீரென்று குறைகிறது. இங்ஙனம் சீரிடை நிலைஆற்றல் கிணற்றில் எலெக்ட்ரானின் இயக்கம் இன்னதென்று அறிந்து கொள்ள முடியாதவாறு சிக்கலாகிவிடும்.



படம் 4.5 (அ) கட்டற்ற எலெக்ட்ரான் கொள்கையில் பயன்படுத்திய உலோகத்தின் செவ்வக வடிவமான நிலை ஆற்றல் கிணறு.
(ஆ) உலோகத்திலுள்ள மெய்யான சீரிடை அல்லது மடக்குநிலை நிலைஆற்றல் கிணறு.



படம் 4.6 ஒருதனி அணுவின் மிகக்கூர்மையான ஆற்றல் மட்டங்களும், திண்மப் பொருளில் உள்ள ஆற்றல்பட்டைகளும்.

திண்மப் பொருள்களில் அணுக்கள் நெருக்கமாய் அமையும்போது என்ன நிகழ்கிறது என்பதையும் சிறிது காண்போம். ஒரு தனி அணுவில் உள்ள எலெக்ட்ரான்கள் அனைத்தும் நன்கு கட்டுண்ட நிலையில் இருக்கும். அதனால், அவைகளின் ஆற்றல் மட்டங்கள் மிகக்கூர்மையாயும், தனித்தனியாயும் இருக்கும் (படம் 4.6). அதே சமயம் ஒரேவகையான இரண்டு அணுக்களை ஒன்றுசேர்க்கும்போது, தொடக்கத்தில் ஒவ்வொரு அணுவிற்கும் ஒரேமாதிரியான ஆற்றல்மட்டங்கள் இருந்தாலும் அவைகளை ஒன்று சேர்த்தபின் ஒவ்வொரு ஆற்றல் மட்டமும் இரண்டாய்ப் பிரிகிறது. பிரிந்த மட்டங்களில் ஒன்று தொடக்கநிலை ஆற்றல் மட்டத்திற்கு மேலேயும் மற்றொன்று அதன் கீழேயுமாயுள்ளன. வெவ்வேறு அணுக்களில் உள்ள எலெக்ட்ரான்களின் அலைச்சார்புகள் ஒன்றனையொன்று குறிப்பிட்ட அளவு மேற்பொருந்தும் (overlap) போதுதான் **ஆற்றல் மட்டங்களின் பிரிகை** (splitting of energy levels) நன்கு இருக்கும். இணைதிற எலெக்ட்ரான்களுக்கு அலைச் சார்பு மேற்பொருந்துதல் அதிகமாயும், அணுக்கருவுக்கு அருகில் உள்ள உட்கூட்டில் உள்ள எலெக்ட்ரான்களுக்கு அது மிகக்குறைந்தும் இருக்கும். எனவே, ஒரு திண்மத்தினை N அணுக்களால் ஒழுங்காக அமைந்த ஓர் அமைப்பாக எடுத்துகொண்டால் ஒவ்வோர் அணுஆற்றல் மட்டமும் N மட்டங்களாகப் பிரியும். ஒரு சிறுஆற்றல் இடைவெளிக்குள் இந்த N மட்டங்களும் அமைய வேண்டுமாதலாலும் திண்மத்திலுள்ள அணுக்களின் எண்ணிக்கை மிக உயர்ந்து இருப்பதாலும் இந்த N மட்டங்களும் ஒன்றுக்கொன்று மிக நெருங்கியிருக்கும். உண்மையில் அவை தனித்தனி மடட்டங்களானாலும் அந்த N மட்டங்களும் தொடர்ச்சியான ஓர் **ஆற்றல் பட்டை** (energy band)யாகத் திகழும். இந்த ஆற்றல்பட்டையின் அகலம் அணிக்கோவையில் அருகருகே உள்ள அணுக்களின் எலெக்ட்ரான்திரள்கள் எவ்வளவு வீதத்தில் மேற்பொருந்தியுள்ளன என்பதைத் சார்ந்தது. படம் 4.6இல் அணுக்களை ஒன்று சேர்க்கும்போது எங்ஙனம் அணு ஆற்றல் மட்டங்கள் பட்டைகளாக மாறுகின்றன என்பதைக் காட்டப்பட்டுள்ளது. மேலும் ஆற்றல்பட்டைகள், அணுஇடைத்தூரம் மிகவும் குறைவாயிருக்கும் போதுதான் தோன்றுகின்றன. உதாரணமாக, சோடியம் திண்மத்தில் அணு இடைத்தூரம் 5 ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகளுக்குள் இருக்கும்போது அணுமட்டங்களின் பிரிகை மிக அதிகமாக உள்ளது. ஆனால் அணுஇடைத்தூரம் 20 ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகளுக்கு மேல் இருக்கும் போது அணு மட்டங்களின் பிரிகை மிகக்குறைவாக உள்ளது. இந்த ஆற்றல்பட்டைகளில் அடங்கிய ஆற்றல்களைத்தான் திண்மத்திலுள்ள எலெக்ட்ரான்கள்பெறமுடியும். எனவே, இவை **அனுமதிக்கப்பட்ட ஆற்றல்பட்டைகள்** (allowed energy bands) எனப்படும். ஆற்றல் பட்டைகளுக்கு இடைப்பட்ட நிலைகளில் உள்ள ஆற்றல்களை அத்திண்ம அணுக்களிலுள்ள எலெக்ட்ரான்கள் பெறமுடியாதாகையால், இவற்றை '**ஆற்றல் இடைவெளிகள்**(energy gaps)' அல்லது 'விலக்கப்பட்ட ஆற்றல் இடைவெளிகள் (forbidden energy gaps)' என்று கூறுவர்.

1931இல் குரோநிக் (Kronig), பென்னி (Penny) ஆகியோர் ஒற்றைப் பரிமாணச்சீரிடை (periodic) செவ்வகவடிவ நிலைஆற்றல் கிணறு மாதிரியை வைத்து ஆற்றல் இடைவெளி எங்ஙனம் உண்டாகிறது என்பதை ஷ்ரோடிங்கர் சமன்பாட்டைப் பயன்படுத்தி நிரூபித்தனர். இதன் முப்பரிமாண மாதிரி மிகக் கடினமான ஒன்றாகும். இதில் கணக்கீடு

முறைகள் மிகவும் சிக்கலாகவும் உள்ளன. மேலும், பெரிலியம் என்ற உலோகத்தை இந்த மாதிரி மின்கடத்தாப் பொருள் என்று காட்டியது. நாம் இம்மாதிரியைப் பின்பற்றாமல் ஆற்றல் இடைவெளியின் தோற்றத்தை ஓர் எளிய வழியில் காணப் போகிறோம். அந்த எளிய வழிதான் **மண்டலக் கொள்கை** (zone theory) ஆகும். மண்டலக் கொள்கையில் எலெக்ட்ரானின் அலைப்பண்புகள் பயன்படுத்தப்பட்டுள்ளன. இக்கொள்கையைச் சிலர் **பட்டைக் கொள்கை** (band theory) எனவும் கூறுவர். இயங்கும் எலெக்ட்ரானுடன் கூடிய அலையின் அலைநீளம்,

$$\lambda = \frac{h}{p} \qquad .. \quad (4.20)$$

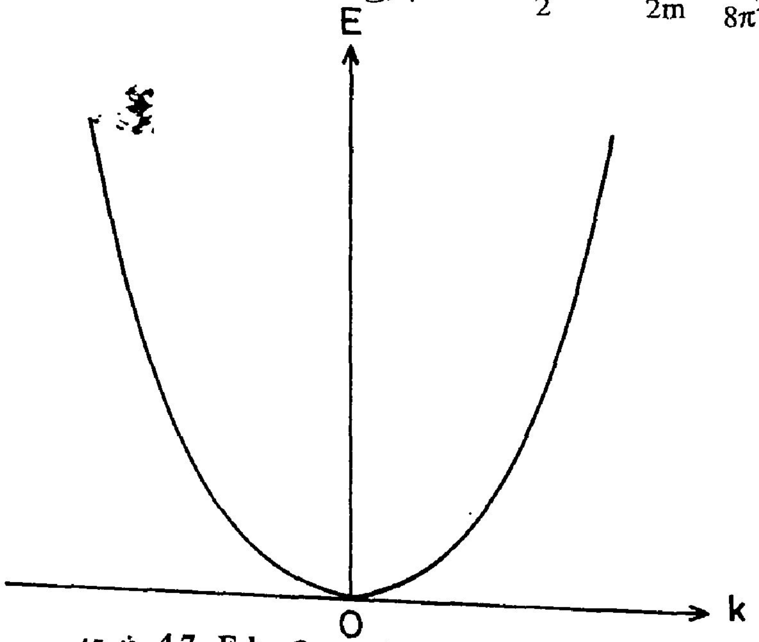
அலை எந்திரவியலில் (wave mechanics) அலை நீளத்திற்குப் பதில் அலை வெக்டார் (wave vector) என்ற கணியத்தைப் பயன்படுத்துவது வழக்கம். இதன் அளவு

$$|\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ மற்றும் } \hbar k = p$$

இதில் 'p' என்பது எலெக்ட்ரானின் உந்தமாகும். நிலைஆற்றல் சுழியொன — இருக்கும்போது எலெக்ட்ரானின் இயக்க ஆற்றல் அதன் மொத்த ஆற்றலுக்குச் சமமாயிருக்கும்.

$$\therefore \; E = \frac{h^2}{8ma^2} = \frac{1}{2} mv^2$$

அதனால் கட்டற்ற எலெக்ட்ரானின் ஆற்றல், $E = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{p^2}{2m} = \frac{h^2k^2}{8\pi^2 m}$ .. (4.21)



படம் 4.7 E-k தொடர்பினைக் காட்டும் வரை

இச்சமன்பாட்டிலிருந்து E க்கும் k*க்கும் பரவளையத்தொடர்பு (parabolic relation) உள்ளதென்பது. தெரிகிறது. படம் 4.7 இன்படி ஒரு கட்டற்ற எலெக்ட்ரானுக்குத் தொடர்ச்சியான 'E' மதிப்புகள் உள்ளன. ஆனால், கட்டுண்ட எலெக்ட்ரானுக்குத் தொடர்ச்சியில்லா 'E' மதிப்புகள் இருக்கும் என்பதனைக் கீழே காணலாம்.

அலைப் பண்புகளால் எலெக்ட்ரான்கள் பிராக் விதியை (Bragg's law) யொட்டி விளிம்பு விளைவு அடையும்.

பிராக் விதி : $n\lambda = 2d \sin\theta$

இங்கே θ என்பது தொடுகோணம் (glancing angle) ;

d என்பது படிகத்தளங்களுக்கு இடையே உள்ள தூரம் ; n என்பது ஒரு முழு எண்.

$$\text{எனவே} \quad \lambda = \frac{2d \sin\theta}{n} \qquad .. \quad (4.22)$$

$$\therefore |\vec{k}| = \frac{2\pi n}{2d \sin\theta}$$

(அல்லது)

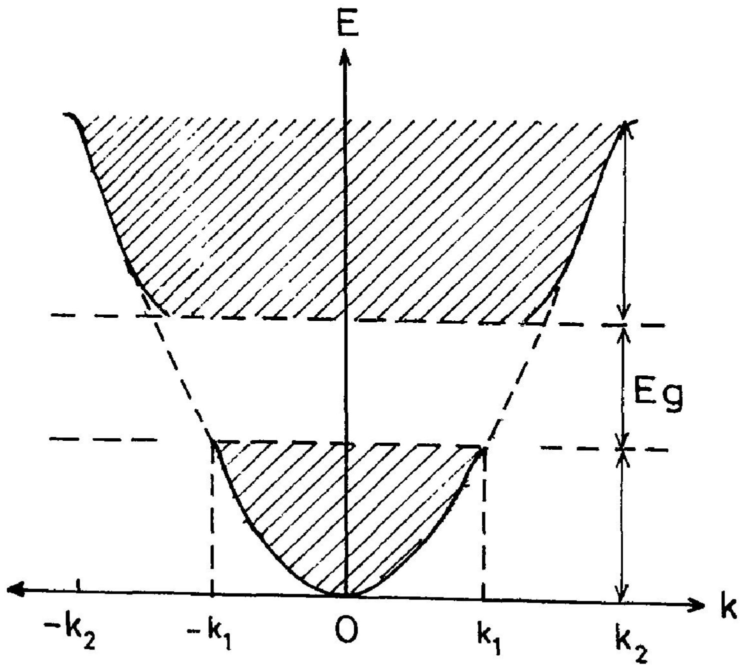
$$k = \frac{n\pi}{d \sin\theta} \qquad .. \quad (4.23)$$

சமன்பாடு (4.23)-ன்படி 'n' ன் பல்வேறு மதிப்புகளையொட்டி கிடைக்கும் 'k' மதிப்புகளில் எலெக்ட்ரான்கள் படிகத்தில் விளிம்பு விளைவு அடையும்; இவ்வாறு விளிம்பு விளைவு அடையும் எலெக்ட்ரான்கள் படிகத்தின் ஊடே எளிதாய் நுழைந்து போகமுடியாது. ஏனெனில் விளிம்பு விளைவு அடையும் எலெக்ட்ரான்கள் எதிரொளிக்கப்பட்டு வந்தவழியே திரும்புகின்றன. படிகத்தின்மீது புறத்தேயிருந்து வந்து படும் எலெக்ட்ரான் கதிரிலுள்ள எலெக்ட்ரான்களுக்கு மட்டுமின்றிப் படிகத்திலுள்ள எலெக்ட்ரான்களுக்கும் (எடுத்துக்காட்டாக, இணைதிறன் எலெக்ட்ரான்கள்) இந்த உண்மை பொருந்தும். இதன்பொருள் என்னவென்றால் சமன்பாடு (4.23)இல் $n = 1, 2, 3, ...$ என இடும் மதிப்புகளுக்குக்கேற்பக் கிடைக்கும் 'k' யின் மதிப்புகளுடைய எலெக்ட்ரான்கள் படிகத்தில் இருக்க முடியாது என்பதாகும். அஃதாவது, படிகத்திலுள்ள ஓர் எலெக்ட்ரான் இந்த 'k' யின் மதிப்புகளால் கிடைக்கும் ஆற்றல்களைப் பெற முடியாது. அதனால், இந்த 'k' யின் மதிப்புகள் தரும் ஆற்றல்கள் படிகத்தில் இருக்கும் எலெக்ட்ரான்களுக்கு விலக்கப்பட்ட ஆற்றல்களாகும். இவ்விதமாய் படிகத்தின் பல

---

* குறிப்பு : போல்ட்ஸ்மென் மாறிலி 'k' யும், அலைவெக்டார் 'k' யும் குறியீடுகளில் ஒன்றாய் இருந்தாலும் ஒன்றனுக்கொன்று சம்பந்தமில்லாத வெவ்வேறு கணியங்களாகும். இதேபோல் சில நூலாசிரியர்கள் மின்கடத்தாப் பொருள் மாறிலிக்கும் 'k' யைப் பயன்படுத்தியுள்ளனர். இவ்விதச்சிக்கலைக் குறைப்பதற்காகவே மின் கடத்தாப்பொருள்கள் என்ற அத்தியாயத்தில் மின்கடத்தாப்பொருள் மாறிலிக்கு 'ε_r' என்னும் குறியீடு பயன்படுத்தப்பட்டுள்ளது.

திசைகளிலும் உள்ள விலக்கப்பட்ட ஆற்றல்களின் தொகுப்பே விலக்கப்பட்ட ஆற்றல் இடைவெளியாகும்.



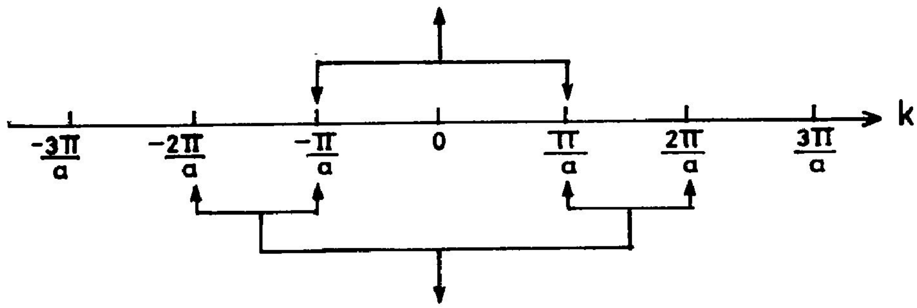
படம் 4.8 பிராக் விளிம்பு விளைவின் விளைவால் E-k பரவளையக்கோடு தொடர்ச்சியற்றுப் போகுதல். விலக்கப்பட்ட ஆற்றல் மதிப்புகளில் வளைகோட்டின் சரிவு சுழியாகிறது.

அலைவெக்டார் 'k' க்கும், ஆற்றல் 'E' க்கும் உள்ள தொடர்பினைக் காட்டும் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களுக்குரிய பரவளையக் கோடு, ஆற்றல் இடைவெளி வரும் இடங்களில் தொடர்ச்சியற்றுப் போகும். இதனைப் படம் 4.8 இல் காட்டப்பட்டுள்ளது. படிகத்தில் இந்தபிராக் விளிம்பு விளைவுக்கு உள்ளாகும் எலெக்ட்ரான்கள், அணுக்களது வெளிக்கூடு எலெக்ட்ரான்களாய இணைதிற எலெக்ட்ரான்கள் ஆகும். உட்கூடுகளில் உள்ள எலெக்ட்ரான்கள் (அணுக்கருவிற்கு அண்மையில் உள்ளவை) அவ்வளவாகப் பாதிக்கப்படுவதில்லை. மேலும் பிராக் விளிம்பு விளைவு அணிக்கோவையின் சீரிடைநிலை ஆற்றல் கிணற்றின் அளவைச் சார்ந்தது ; அதன் அளவு அதிகரித்தால் விளிம்பு விளைவு மிகுதியாகும். விளிம்பு விளைவு மிகுதியானால் விலக்கப்பட்ட பட்டையின் அளவு அதிகரிக்கும். மேலும், எலெக்ட்ரானின் ஆற்றல் மிகுதியாயின் அனுமதிக்கப்பட்ட பட்டையின் அகலம்கூடும் ; அதே சமயம் விலக்கப்பட்டப்பட்டையின் அகலம் குறையும். படம் 4.8 ஒற்றைப் பரிமாணத்தில் வரையப்பட்டுள்ளது. படிகத்தை எடுத்துக்கொண்டால் அது முப்பரிமாணம் உடையது. அதனால், படிகத்தின் எல்லாப் படிக திசைகளிலும் மாறுபட்ட 'k' யின் மதிப்புகளில் E-k வரை தொடர்ச்சியில்லாமல் இருக்கும். இவ்விதமாய் எல்லாத் திசைகளிலும் உள்ள மொத்த ஆற்றல் இடைவெளியே அப்படிகத்தின்

விலக்கப்பட்ட பட்டை அல்லது விலக்கப்பட்ட ஆற்றல் மண்டலம் அல்லது பட்டை இடைவெளியாகும். இவ்வித விலக்கப்பட்ட ஆற்றல் இடைவெளியில் உள்ள ஆற்றல் மதிப்புகளை ஓர்எலெக்ட்ரான் எந்தத் திசையில் இயங்கினாலும் எடுத்துகொள்ள முடியாது. ஆனால், ஆற்றல் பட்டைகள் வெவ்வேறு திசைகளில் தேவையான அளவு ஒன்றனையொன்று மேற்பொருந்தும்போது இந்த ஆற்றல் இடைவெளி மறைந்துவிடும். இந்நிகழ்ச்சி இருஇணைதிற உலோகங்களில் நடைபெறுகிறது.

4.4.2 பிரில்லாயின் மண்டலங்கள் (Brillouin zones)

அலைவெக்டார் ‘k’ யின் அனுமதிக்கப்பட்ட மதிப்புகளை முப்பரிமாணத்தில் காட்டுவதே பிரில்லாயின் மண்டலமாகும். இதுபற்றிய எளிய விளக்கத்திற்காக நாம் முதலில் ஓர்ஒற்றைப் பரிமாண ஒற்றைஅணு அணிக்கோவையை (monoatomic lattice) எடுத்துக்கொள்வோம். அதன் அணிக்கோவை மாறிலி ‘a’ எனக் கொள்க. படம் 4.9 இல்



படம் 4.9 ஒற்றைப்பரிமாண ஒற்றை அணு அணிக்கோவையின் முதலிரண்டு பிரில்லாயின் மண்டலங்கள்.

உள்ள படுக்கைக்கோடு ‘k’ யின் மதிப்பைத் தருவதாக உள்ளது. மேலும், அக்கோடு $\frac{\pi}{a}$ என்னும் மதிப்பினை உடைய துண்டுகளாய்ப் பிரிக்கப்பட்டுள்ளது. மேற்கண்ட படத்தில் அணு இடைத்தூரம் ‘a’ எனவும், $\theta = \frac{\pi}{2} = 90^\circ$ எனவும் எடுத்துக்கொள்ளப்பட்டுள்ளது. அதனால் k யின் மாறுநிலை மதிப்புகள் (பிராக் விதியின்படி),

$$k_n = \frac{n\pi}{a}$$

இங்கு $n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, ...$

எனவே $k_1 = +\frac{\pi}{a}, -\frac{\pi}{a}$

மேற்கூறிய k_1 இன் மதிப்புகளில் ஆற்றல் தொடர்ச்சி அறுதல் நிகழும். அஃதாவது, π/a யிலிருந்து $-\pi/a$ வரையிலுள்ள ஆற்றல் மதிப்புகள் அனுமதிக்கப்பட்டவை. அதனால் π/a யிலிருந்து $-\pi/a$ வரையிலுள்ள பகுதி முதல் பிரில்லாயின் மண்டலம் (first Brillouin zone) எனப்படும். அடுத்து அனுமதிக்கப்பட்ட ஆற்றல் பகுதி π/a யிலிருந்து $2\pi/a$ வரையும், மேலும் $-\pi/a$ யிலிருந்து $-2\pi/a$ வரைக்கும் ஆன 'k' மதிப்புகளுடையதாகும். இஃது இரண்டாம் பிரில்லாயின் மண்டலம் எனப்படும்.

இவ்விதமான மண்டலங்கள் மூலம் திண்மப் பொருள்களின் பண்புகளை விளக்கும் முறையை முதன்முதலில் பிரில்லாயின் நடைமுறைக்குக்கொண்டு வந்தார். அவர் கூற்றின்படி 'k' வெளியில் (k-space) உள்ள மண்டலங்களின் எல்லைக்கோடுகளின் இருப்பிடங்களின் மூலம், மடக்குநிலை இயலமைப்புகளில் எலெக்ட்ரான் அலைஇயக்கத்தின் சிறப்பு அம்சங்களை விளக்கலாம். இந்த மண்டல எல்லைகளின் இருப்பிடங்கள் படிக இயலமைப்பின் வடிவியல் முறையில் கணக்கிடப்படுகிறது. மேலும், இவை எலெக்ட்ரான் – அணிக்கோவை இடைவினையைச் சார்ந்ததன்று. ஆற்றலின் தொடர்ச்சி அறுதல் மண்டலங்களின் எல்லைகளில் உண்டாகிறது. பிரில்லாயின் மண்டலங்களை நேரடியாகவே பிராக் விதியின் மற்றொரு உருவமாய

$$2\vec{k}.\vec{G}. + G^2 = 0 \quad .. \quad (4.24)$$

என்ற சமன்பாட்டிலிருந்து கண்டுபிடிக்கலாம். இதில் 'G' என்பது 2π மடங்கு அளவுள்ள தலைகீழ் அணிக்கோவை வெக்டாராகும்.

இப்பொழுது ஓர் இரட்டைப் பரிமாண சதுர அணிக்கோவையை எடுத்துக் கொள்வோம். இதன் தலைகீழ் அணிக்கோவை வெக்டார்கள்

$\left(\frac{n_1}{a}\right)\hat{i} + \left(\frac{n_2}{.a}\right)\hat{j}$ என்னும் உருவில் இருக்கும். இதில் 'a' என்பது அணிக்கோவை மாறிலி; n_1, n_2 ஆகியவை முழு எண்களாகும்.

$$\text{எனவே} \quad G = \frac{2\pi}{a}\left(n_1\hat{i} + n_2\hat{j}\right) \quad .. \quad (4.25)$$

சதுர அணிக்கோவையில் ஓர் எலெக்ட்ரான்அலை பிரதிபலிக்கப் பிராக் சமன்பாடு (4.24) பின்வருமாறு உருக்கொள்ளும்.

$$k_x n_1 + k_y n_2 = \frac{\pi}{a}\left(n_1^2 + n_2^2\right) \quad .. \quad (4.26)$$

இங்கே n_1 என்பது செங்குத்துத் தளங்களில் ஏற்படும் விளிம்பு விளைவுக்குறிய முழுஎண் மதிப்புகள் ; n_2 என்பது கிடைத்தளத்திற்குரியது.

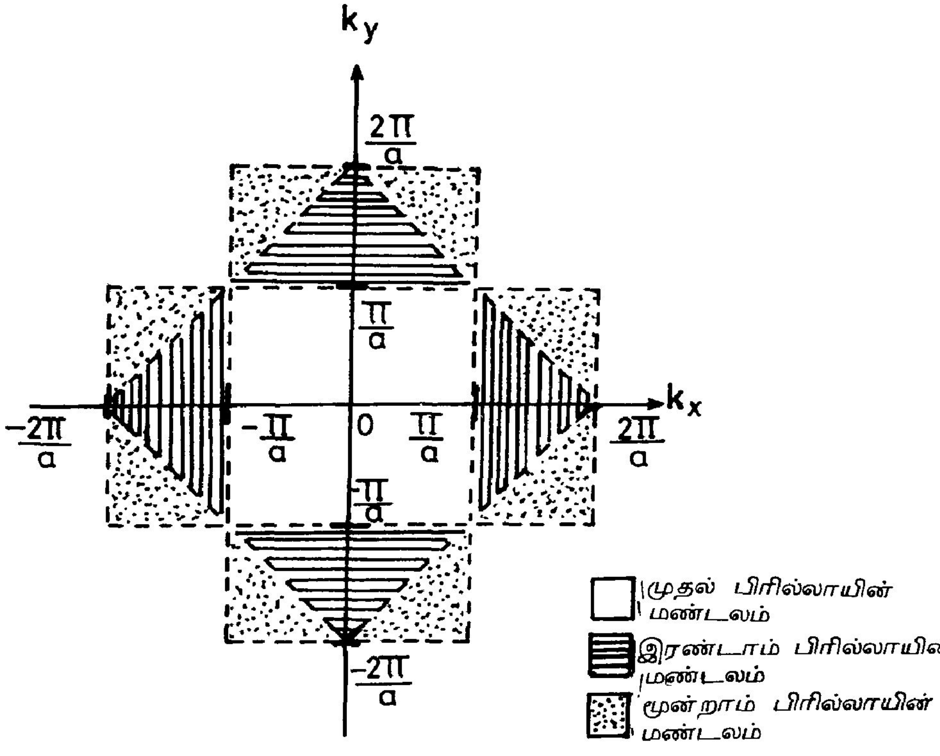
$$n_1 = \pm 1, n_2 = 0 \text{ மற்றும் } n_1 = 0, n_2 = \pm 1$$

எனக் கொண்டு முதல் மண்டலத்தின் எல்லையைக் கண்டுபிடிக்கலாம்.

சமன்பாடு (4.26)இல் $n_1 = \pm 1, n_2 = 0$ என இட $k_x = \pm \pi/a$ .. (4.27)

சமன்பாடு (4.26)இல் $n_1 = 0, n_2 = \pm 1$ என இட $k_y = \pm \pi/a$ .. (4.28)

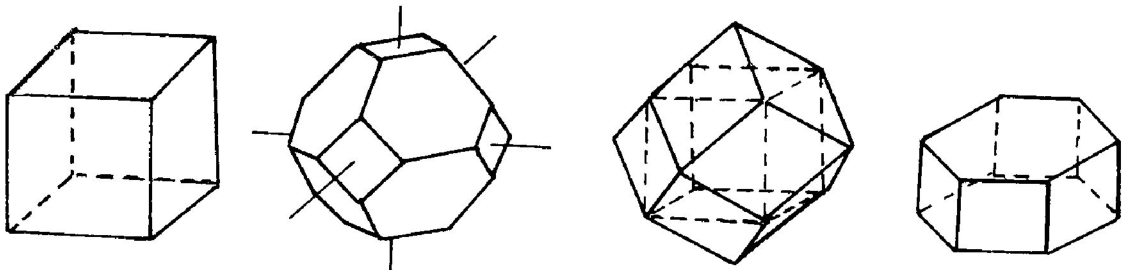
சமன்பாடு (4.27), (4.28) களில் உள்ள நான்கு நேர்க்கோடுகளும் முதல் மண்டலத்தின் எல்லையை வரையறுக்கின்றன. இந்நான்கு கோடுகளும் படம் 4.10இல் காட்டியபடி ஒரு சதுரமாய் அமையும். இரண்டாம் மண்டலவெளி எல்லையைப் பின்வருமாறு வரையறுக்கலாம் : சமன்பாடு (4.26)இல் $n_1 = \pm 1, n_2 = \pm 1$ என்று இட நமக்கு நான்கு நேர்கோடுகளின் சமன்பாடுகள் கிடைக்கும்.



படம் 4.10 இரு பரிமாணச் சதுர அணிக்கோவையின் முதல் மூன்று பிரில்லாயின் மண்டலங்கள்

$$\text{அஃதாவது, } \pm k_x \pm k_y = 2\,\pi/a \qquad .. \; (4.29)$$

இதிலுள்ள குறிகள் சுயேச்சைகளாகும். அதாவது, k_x சும், k_y யும் நேர்க்குறி உடையனவாகவோ, எதிர்க்குறி உடையனவாகவே, ஒன்று நேர்க்குறி மற்றொன்று எதிர்க்குறி உடையனவாகவோ இருக்கலாம். இதற்குமேல் உள்ள பிரில்லாயின் மண்டல எல்லைகளை வரையறுப்பது மிகக் கடினமாகும். ஏனெனில், மிகுதியான பிராக் பிரதிபலிப்புகள் உயர் மண்டலங்களில் நடைபெறுகின்றன.



படம் **4.11** சிலபடிக இயலமைப்புகளின் முதல் பிரில்லாயின் மண்டலங்கள்.

ஓர் எளிய கனசதுர அணிக்கோவையின் பிரில்லாயின் மண்டலங்களைக் கீழ்க்காணும் சமன்பாட்டினைக்கொண்டு கணக்கிடலாம்.

$$k_x n_1 + k_y n_2 + k_z n_3 = \frac{\pi}{a}\left(n_1^2 + n_2^{\,2} + n_3^2\right) \qquad .. \; (4.30)$$

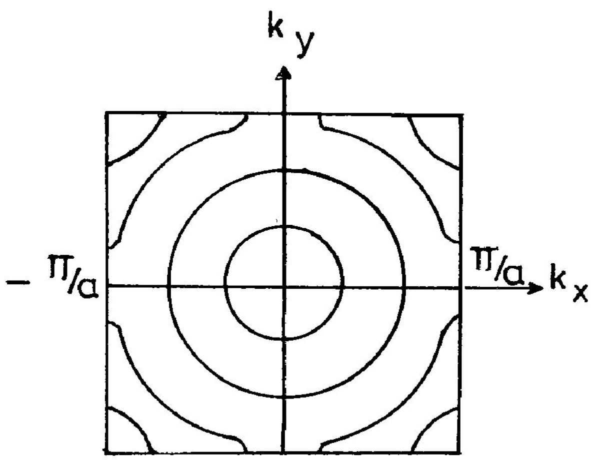
இதிலிருந்து எளிய கனசதுர அணிக்கோவையின் முதல் பிரில்லாயின் மண்டலம் ஒரு கனசதுரம் எனக்காட்டலாம். இக் கனசதுரத்தின் சுவர்கள் k_x, k_y, k_z அச்சுகளை $+\pi/a, -\pi/a$ புள்ளிகளில் வெட்டும். படம் 4.11இல் எளிய கனசதுரம், உருவ மையக் கனசதுரம், முகமையக் கனசதுரம், நெருக்கப் பொதிவுடைய அறுங்கோணம் ஆகிய படிக இயலமைப்புகளில் முதல் பிரில்லாயின் மண்டலங்கள் காட்டப்பட்டுள்ளன.

ஃபெர்மி புறப்பரப்புப்பற்றிச் சிறிது அறிந்திருந்தால், ஒருவர் பொருள்களின் மின்னியற் பண்புகளை மேற்கண்ட மண்டல அமைப்புகளின் மூலம் தெரிந்து கொள்ளலாம்.

4.4.3 ஃபெர்மி புறப்பரப்பு (Fermi Surface)

ஃபெர்மி புறப்பரப்பு என்பது k– வெளியில் ஃபெர்மி ஆற்றல் என்னும் மாறா ஆற்றலை உடைய ஒருபுறப்பரப்பாகும். மேலும், அதனை நிறைவு பெற்ற ஆற்றல்

நிலைகளை வளைத்துக்காட்டும் ஆற்றல் உருவரை (energy contour) என்றும் கூறுவர். சுழிகெல்வின் வெப்பநிலையில் ஃபெர்மி புறப்பரப்பு, நிறைவு பெற்றநிலைகளையும், காலியான நிலைகளையும் வெவ்வேறாய்ப் பிரிக்கிறது. ஃபெர்மி புறப்பரப்பின் மூலம் ஒருபொருளின் மின் பண்புகளைப்பற்றி நன்கு தெரிந்துக்கொள்ளலாம். k – வெளியில் சம ஆற்றலுள்ள புள்ளிகளையெல்லாம் இணைத்தோமானால் நமக்கு ஆற்றல் உருவரைக் கோடுகளின் தொகுதி ஒன்று கிடைக்கும். ஓர் எளிய கனசதுரப் படிகத்தில் கட்டற்ற அல்லது இணைதிற எலெக்ட்ரான்களுக்கு உரிய ஆற்றல் உருவரைக் கோடுகள், படம் 4.12இல் காட்டப்பெற்றுள்ளன.



படம் 4.12 *வலிமை குறைந்த அணுஇடைப்பிணைப்பினை உடைய இருபரிமாண சதுர அணிக்கோவையில் உள்ள முதல் பிரில்லாயின் மண்டலத்தின் ஆற்றல் உருவரைக்கோடுகள்.*

மேற்கண்ட படத்தின் உள்ளேயுள்ள வட்டமான ஆற்றல் உருவரைக் கோடுகள் முதல் பிரில்லாயின் மண்டலத்திற்கு உரியன. முப்பரிமாணங்களில் இவற்றை வரைந்தால் இவ்வட்டங்கள் கோளங்களாய் இருக்கும். படத்தில் இரண்டாம் பிரில்லாயின் மண்டலத்தின் முதலிரண்டு ஆற்றல் உருவரைக் கோடுகளும் காட்டப்பட்டுள்ளன. உள்கோடுகள் காட்டும் ஆற்றல்களுடைய எலெக்ட்ரான்களின் அலை எண்கள் சமன்பாடு (4.23) லிருந்து கிடைக்கும் மாறுநிலை மதிப்புகளிலிருந்து மிக விலகியிருக்கும். அதனால், இந்த எலெக்ட்ரான்களது இயக்கத்திசைக்கு எவ்விதக் கட்டுப்பாடுமில்லை. ஆற்றல் உருவரைக் கோடுகள் மண்டலத்தின் எல்லையினை எட்டமுயலுகையில் இஃது உண்மையாகாது. அலைஎண்கள் மாறுநிலை மதிப்புகளை எட்டமுனையும் போது அவற்றிற் கியைந்த ஆற்றல் மதிப்புகள் மிக மெதுவாய் மாறும். இதனால், உருவரைக் கோடுகள் மண்டல எல்லையில் புடைத்து(bulge)க் கொள்கின்றன. மண்டலத்தின் மூலைகளிலேயுள்ள உருவரைகள் மண்டல எல்லைகளில் முடிந்துவிடுகின்றன. ஏனெனில், இங்கே ‘k’ மதிப்புகள் மண்டலத்தின் வேறெந்த இடங்களில் உள்ளதையும்விட மிகுதியாகும். இரண்டாம் மண்டலத்தின் முதல் உருவரைக் கோட்டினது ஆற்றல்

முதல்மண்டலத்தில் கடைசி உருவரை கோட்டினது ஆற்றலைவிட மிகுதியாகவோ, குறைவாகவோ இருக்கலாம். இரண்டாம் மண்டல முதல்கோட்டின் ஆற்றல் முதல் மண்டலத்தின் கடைசிக் கோட்டின் ஆற்றலைவிடமிகுதியாயிருந்தால் இரண்டிற்குமிடையில் ஆற்றல் இடைவெளி ஏற்படுகிறது. அவ்வாறின்றிக் குறைவாயிருந்தால் இருமண்டலங்களும் ஒன்றன்மீதொன்று மேற்பொருந்தும் (overlap). ஒவ்வோர் ஆற்றல் நிலையும் இரண்டு எலெக்ட்ரான்களை ஏற்க முடியுமாதலால் மண்டலங்கள் ஒன்றன்மீதொன்று மேற்பொருந்தா நிலையில் முதல்மண்டலத்திலுள்ள எல்லா நிலைகளுமே நிறைவு பெறும். மண்டலங்கள் மேற்பொருந்தும் போது இரண்டாம் மண்டலத்தின் அடியிலுள்ள கவள நிலைகளின் ஆற்றல் முதல்மண்டலத்தின் மூலைகளிலுள்ள ஆற்றல்களைவிடக் குறைவாயிருப்பதால் இந்த இரண்டாம் மண்டலத்தின் அடிப்பகுதிக் கவள நிலைகள் முதலில் நிறைவுறும். அதற்குப் பின்தான் இதன் முதல்மண்டல மூலைநிலைகள் எலெக்ட்ரான்களால் நிரப்பப்படும். அதனால், மேற்பொருந்துதல் உள்ள பொருள்களில் வெளிப்புற மண்டலங்கள் அரைகுறையாகத்தான் நிரம்பியிருக்கும்.

4.4.4 கடத்திகள், குறைகடத்திகள், அரிதிற்கடத்திகள்

நாம் பொருள்களின் மின் எதிர்ப்புத் திறன், ஃபெர்மி புறப்பரப்பின் இயக்கம், ஆற்றல் இடைவெளி ஆகியவற்றைக் கொண்டு அவைகளைக் கடத்திகள், குறைகடத்திகள், அரிதிற்கடத்திகள் எனப் பிரிக்கலாம்.

அ) மின்எதிர்ப்புத்திறன் (electrical resistivity) :

வ.எண்	பொருள்	அறைவெப்பநிலையில் மின் எதிர்ப்புத்திறன்
1	கடத்தி	10^{-9} லிருந்து 10^{-4} ஓம்மீட்டர் வரை.
2.	குறைகடத்தி	10^{-4} லிருந்து 10^{3} ஓம்மீட்டர் வரை.
3.	அரிதிற்கடத்தி	10^{3} லிருந்து 10^{17} ஓம்மீட்டர் வரை.

ஒருபொருளின் மின்எதிர்ப்புத் திறன் மிகக் குறைவாயிருந்தால் (~ 1 மைக்ரோ ஓம்மீட்டர்) அதனை ஒருகடத்தி அல்லது உலோகம் என எளிதில் கூறிவிடலாம். அதேசமயம் மின்எதிர்ப்புத்திறன் மிக அதிக அளவில் இருந்தால் (~ 1 மெகா ஓம்மீட்டர்) அதனை ஓர் அரிதிற்கடத்தி அல்லது மின் கடத்தாப் பொருள் எனக் கூறிவிடலாம். இதற்கு இடைப்பட்ட மின்எதிர்ப்புத் திறன் உடைய பொருள்களைக் குறைகடத்திகள் என அழைக்கலாம். மேலும், உலோகத்தில் வெப்பநிலை கூடினால் அதன் மின்எதிர்ப்புத்திறனும் கூடும். ஏனெனில், வெப்பநிலை உயரும்போது அதன் சராசரி மோதலிடைத் தூரத்தின் (mean freepath) மதிப்புக் குறைகிறது. ஆனால், குறைகடத்திகளிலும், மின்கடத்தாப் பொருள்களிலும் வெப்பநிலை உயரும்போதுமின் எதிர்ப்புத்திறன் மதிப்புக் குறைகிறது. ஏனெனில், இவற்றில் மின்னூட்டங்களின் எண்ணிக்கை வெப்பநிலை உயரும் போது கூடுகிறது. குறிப்பாகக் குறைகடத்தியின் மின்

கடத்துந்திறன் வெப்பநிலையை மிகுதியாய்ச் சார்ந்துள்ளது. மேலும் கடத்திகளில் மாசுக்கள் கலக்கப்படும் போது மின் எதிர்ப்புத்திறன் மிகுதியாகிறது. ஆனால், குறைகடத்திகளான ஜெர்மேனியம், சிலிக்கான் ஆகியவற்றில் மூன்று இணைதிறன் அல்லது ஐந்து இணைதிறன் கொண்டமாசு அணுக்களைக் கலக்கும் போது மின் எதிர்ப்புத் திறன் குறைகிறது. இதற்குக்காரணம் மின்னூட்ட அடர்த்தி அதிகமாவதேயாகும்.

ஆ) ஃபெர்மி புறப்பரப்பின் இயக்கம் :

உலோகங்களில், ஃபெர்மி கோளம் (fermi sphere) நகருதற்குத் தேவையான வெளி, மண்டலங்களில் இருக்கிறது. அதனால், ஃபெர்மி கோள இயக்கத்தின் விளைவாய் அவற்றில் மின்கடத்துந்திறன் மிகுதியாய் ஏற்படுகிறது. ஓர்இணைதிறன் உள்ள உலோகத்தை எடுத்துக்கொண்டால் அதன் ஒவ்வோர் அணுவிலும் ஒருகட்டற்ற எலெக்ட்ரான் இருக்கும். அதனால், முதல் மண்டலத்தில் பாதிமட்டும் நிரப்பப்பட்டு இருக்கும். இதன் விளைவாய் ஃபெர்மி புறப்பரப்பு, மண்டலத்தின் உள்ளுக்குள் இருக்கிறது. மேலும், அஃது ஏறத்தாழ ஒருகோளவடிவமுள்ளதாயும் உள்ளது. மண்டலத்தின் மிகுதியான வெளி காலியாய் இருப்பதால் ஃபெர்மி கோளம் மண்டலத்திற்குள் நன்கு நகர முடியும், மேலும், இக்கோளம் மண்டல எல்லையைத் தொடுதற்குமுன் அலை வெக்டாரின் மதிப்பில் மிகுதியான மாற்றங்களை உண்டுபண்ண முடியும். அதனால் ஓர் இணைதிறன் உள்ள சோடியம், தங்கம், வெள்ளி போன்றவை நன்மின்கடத்திகளாய் உள்ளன. அதேபோல், இருஇணைதிறன் உள்ள உலோகங்களில் ஃபெர்மி புறப்பரப்பின் ஒருபகுதி ஒருமண்டலத்திலும், மற்றொரு பகுதி அடுத்த மண்டலத்திலும் உள்ளன. இஃது ஆற்றல்பட்டைகள் மேற்பொருந்துவதால் ஏற்படுகிறது. அதனால், ஃபெர்மி புறப்பரப்பு மண்டலத்தின் வெளியில் நகருவதற்கு இருஇணைதிற உலோகங்களிலும் கட்டுப்பாடு ஏதும் இல்லை. எனினும், ஃபெர்மி புறப்பரப்பு இயக்கத்திற்கு ஓர் இணைதிற உலோகங்களில் உள்ள உரிமையின் அளவு போல் இருஇணைதிற உலோங்களில் இல்லை. அதனால், இருஇணைதிற உலோகங்களான மக்னீசியம், துத்தநாகம், காட்மியம் போன்றவை வெள்ளியைப் போன்று இல்லாவிட்டாலும், சுமாரான கடத்திகளாகும். மூன்று இணைதிறன் கொண்ட அலுமினியத்திலும் ஃபெர்மி புறப்பரப்பு நகர்வதற்கு மிகுதியாய் வெளிஉள்ளதால் அஃது ஒருநன்மின்கடத்தியாய் உள்ளது. இக்கருத்தின்படி பார்த்தால், அது மின் கடத்தும் பண்பில் ஏறக்குறைய ஓர் இணைதிற உலோகத்தைப் போல் உள்ளது.

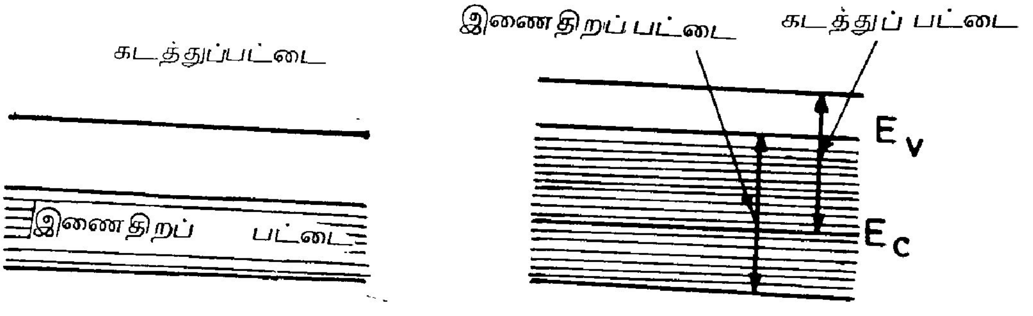
ஜெர்மேனியம், சிலிக்கான் ஆகியவற்றில் ஃபெர்மி புறப்பரப்பு மண்டல எல்லையில் அநேக இடங்களில் தொட்டுக்கொண்டிருக்கிறது. அந்த இடங்களில் எல்லாம் ஃபெர்மி புறப்பரப்புச் சீர்குலைவு அடைகிறது. மேலும் அந்தத் திசைகளில் எல்லாம் ஃபெர்மி புறப்பரப்பால் நகர முடியாது. அதனால் மின்கடத்தலில் ஒருசில எலெக்ட்ரான்களே பங்கு கொள்கின்றன. இவ்வாறு இவ்வகைப் பொருள்கள் நன்மின்கடத்திகளாய் ஆக முடியாது. அதனால், இவற்றிற்குக் குறைகடத்திகள் என்று பெயர் வரலாயிற்று. கந்தகம், டெரிலியம் ஆகியவற்றிலும் ஃபெர்மி புறப்பரப்பு ஏறத்தாழ எல்லா இடங்களிலும் மண்டல எல்லையைத் தொட்டுக்கொண்டிருக்கிறது. அதனால், ஃபெர்மி புறப்பரப்பு இங்குமங்கும்

நகர முடியாது. எனவே மேற்கூறிய இரண்டு பொருள்களும் மின்கடத்தாப் பொருள்களாகும். குறிப்பாய் மின்கடத்தாப் பொருள்களில் ஃபெர்மி புறப்பரப்பிற்கு இயக்கமே இல்லாதவாறு மண்டல எல்லையோடு அதுநன்கு மேற்பொருந்திவிடுகிறது. அதனால், அவற்றில் மின்கடத்தல் ஏதும் நிகழ்வதில்லை.

இ) ஆற்றல் இடைவெளி (Energy gap):

k- வெளியில் பிரில்லாயின் மண்டலங்களை எடுத்துக்கொண்டதற்குப் பதிலாய் வெறும் ஆற்றல் நிலைகளை மட்டிலும் எடுத்துக்கொண்டோமானால் நமக்கு ஆற்றல் பட்டைகள் கிடைக்கும். மண்டலங்களில் எலெக்ட்ரான்கள் நிரம்பும் மாதிரியே பட்டைகளிலும் எலெக்ட்ரான்கள் இடம்பிடிக்கும். முதலில் முதல்பட்டையும், அது நிறைந்தால் அடுத்த பட்டையும் என எலெக்ட்ரான்கள் இடம்பிடிக்கும். பொருளின் மின்கடத்துப்பண்புகளைப் பார்க்கும்போதுஎலெக்ட்ரான்கள் நிறைந்துள்ள அடிப்பட்டைகளைக் கணக்கில் எடுத்துக்கொள்வதில்லை. எலெக்ட்ரான்கள் உள்ள உயர்மட்டப் பட்டையும், அதற்கு மேலுள்ள பட்டையும் மட்டும் எடுத்துக்கொள்ளப்படும். அவை முறையே இணைதிறப் பட்டை (valence band), கடத்துப் பட்டை (conduction band) என அழைக்கப்படும். அஃதாவது, முழுதுமோ, ஒருபகுதி மட்டுமோ இணைதிற எலெக்ட்ரான்களால் நிரம்பியுள்ளதும், கடைசியில் உள்ளதுமான உயர்மட்டப்பட்டையை '**இணைதிறப் பட்டை**' எனவும் அவ்விணைதிறப் பட்டைக்குமேல் உள்ளதும், சுழிகெல்வின் வெப்பநிலையில் காலியாயுள்ளதுமான பட்டையைக் '**கடத்துப் பட்டை**' எனவும் வழங்கப்பெறும்.

கடத்திகளில் கடத்துப்பட்டையும், இணைதிறப் பட்டையும் ஒன்றன் மீதொன்றாய் மேற்பொருந்தி இருக்கும். அல்லது இணைதிறப் பட்டை அரைகுறையாய் நிரம்பியிருக்கும். படம் 4.13 (அ) வில் காட்டியுள்ளபடி ஓர் இணைதிற உலோகங்களில் இணைதிறப் பட்டை நிரப்பப்படாமல் இருக்கும். வெளி மின்புலம் செயல்படும் போது நிரம்பிய

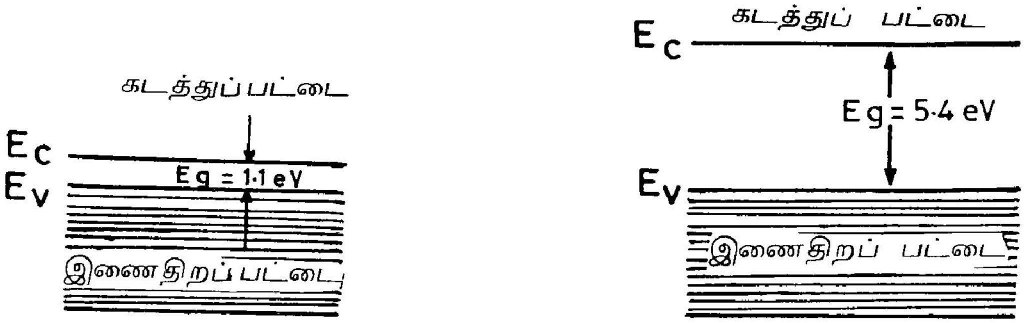


(அ) (ஆ)

படம் 4.13 கடத்திகளில் பட்டைகள் (அ) நிரப்பப்படாமலும் (ஆ) மேற்பொருந்தியும் உள்ளதைக் காட்டும் படங்கள்.

ஆற்றல்நிலையிலுள்ள எலெக்ட்ரான்கள் மின்புலத்தால் முடுக்கப் பெற்று இணைதிறப் பட்டையிலுள்ள காலியான உயர் ஆற்றல்நிலைகளில் நிரம்பும். இவ்வாறு கடத்திகளில் நிறைய மின்னோட்டம் பாய்கிறது. இவ்வாறு இல்லாமல் இரு இணைதிற உலோகங்களில் உள்ளது போல் முழுதும் நிரம்பிய இணைதிறப் பட்டையும், காலியாயுள்ள கடத்துப்பட்டையும் (படம் 4.13 (ஆ)) மேற்பொருந்தியிருந்தாலும் அதிக மின்னோட்டம் பொருளினுள் பாயும். மேற்கூறிய இருவழிகளின் மூலம் கடத்திகளில் மின்கடத்துந் திறன் மிகுதியாயுள்ளது. மேலும், கடத்திகளில் ஆற்றல் இடைவெளியின் மதிப்புச் சுழியாயுள்ளது. தங்கம், வெள்ளி போன்ற ஓர்இணைதிற உலோகங்களில் இணைதிறப்பட்டை முழுதும் நிரப்பப்படாமல் இருக்கிறது. மேலும், மக்னீசியம், பெரிலியம் போன்ற இருஇணைதிற உலோகங்களில் இணைதிறப்பட்டையும், கடத்து பட்டையும் மேற்பொருந்தியுள்ளன. அலுமினியம் போன்ற மூன்று இணைதிற உலோகங்களில் இணைதிறப்பட்டை முழுதும் நிரப்பப்படாமல் இருக்கிறது.

குறைகடத்திகளில் ஆற்றல் இடைவெளி இரண்டிலிருந்து, மூன்று எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு வரைக்கும் அல்லது அதற்கு குறைவாய மதிப்பிலும் இருக்கும். முழுதும்



(அ) (ஆ)

படம் 4.14 (அ) குறைகடத்தியான சிலிக்கான், (ஆ) மின் கடத்தாப் பொருளான வைரம் ஆகியவற்றின் ஆற்றல் பட்டைகள்.

நிரப்பப்பட்ட இணைதிறப் பட்டையும், காலியாயுள்ள கடத்துப் பட்டையும் பிரிக்கப்பட்டிருக்கும்போது ஆற்றல் இடைவெளி உண்டாகிறது. ஆற்றல் இடைவெளி 2 எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டுக்கும் குறைவாய் இருக்கும்போது அறைவெப்பநிலையில் இணைதிறப் பட்டையிலுள்ள சில எலெக்ட்ரான்கள் கிளர்ச்சியடைகின்றன. அதனால், அவை ஆற்றல் இடைவெளியைக் கடந்து, கடத்துப்பட்டைக்குச் செல்ல முடியும். அதனால், அறைவெப்பநிலையில் குறைகடத்திகளால் மின்கடத்தாப் பொருள்களைவிட நல்லமுறையில் மின் கடத்த முடியும். ஆனால், உலோகத்தோடு ஒப்பிடுகையில் அவை மின்கடத்துந் திறனில் பல மடங்குகள் தாழ்ந்தே உள்ளன. மேலும், குறைகடத்திகளில் வேற்றுப்பொருள் அணுக்களைச் சேர்க்கும்போது மின்னூட்ட கடத்திகளின் செறிவு கூடி மின்கடத்துந் திறனும் கூடுகிறது. படம் 4.14 (அ) வில் சிலிக்கானின் ஆற்றல்பட்டைகள் காண்பிக்கப்பட்டுள்ளன. அதன் ஆற்றல் இடைவெளி 1.1 எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு ஆகும். சிலிக்கானில் வேற்றுப்பொருள் அல்லது மாசு கலக்கும் போது அது மாசு உள்ள

சிலிக்கானாகி, வேற்றுப்பொருள் ஆற்றல் மட்டங்கள் ஆற்றல் இடைவேளியில் உண்டாக்கப்படுகின்றன. அதன் காரணமாய் குறைகடத்தியின் மின்கடத்துந்திறன் மிகுதிப்படுகிறது.

மின்கடத்தாப் பொருள்களில் ஆற்றல் இடைவெளி 3 எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டுக்குமேல் இருக்கும். உதாரணமாய் வைரத்தில் ஆற்றல் இடைவெளியின் மதிப்பு 5.4 எலெக்ட்ரான்வோல்ட்டு ஆகும் (படம் 4.14 (ஆ)). இத்தகைய பொருள்களில் அறை வெப்பநிலையில் கிளர்ச்சியடைந்து ஆற்றல் இடைவெளியைக் கடக்கும் எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை மிகமிகக் குறைவானதாயிருக்கும். இணைதிறப் பட்டையிலுள்ள எலெக்ட்ரான் ஒன்று, ஆற்றல் இடைவெளியைக் கடக்க அதற்குக் கொடுக்கப்படும் முடுக்க மின்புலச்செறிவின் அளவு சுமார் மில்லியன் வோல்ட்டு/மீ என இருக்கும். மேலும், மிகுந்த வெப்பநிலையில் இணைதிறப் பட்டையிலுள்ள எலெக்ட்ரான்கள் ஆற்றல் இடைவெளியைக் கடக்க முடியும். எனினும் மின்கடத்தாப் பொருள்களில் மிகுந்த மின்னழுத்தம் அல்லது மிகுந்த வெப்பநிலை இருக்கும்போது சீர்குலைவு (breakdown) ஏற்பட வாய்ப்புண்டு.

இவ்வாறு ஆற்றல் இடைவெளி அல்லது ஃபெர்மி புறப்பரப்பின் இயக்கம் மூலம் கடத்திகளையும், குறைகடத்திகளையும், மின்கடத்தாப் பொருள்களையும் வெவ்வேறாய்ப் பிரிக்கலாம்.

4.4.5 செயலுறு நிறையும், துளைகளும்

ஒரு மின்புலம் அல்லது காந்தப் புலம் அல்லது ஒளிப்புலம் மூலமாய் அணிக்கோவையின் மடக்குநிலை நிலை ஆற்றலில் உள்ள எலெக்ட்ரான் ஒன்றை முடுக்கப்படும் பொழுது அந்த எலெக்ட்ரானின் நிறையை நாம் **செயலுறு நிறை** எனக் கூறுகிறோம், அதாவது செயலுறுநிறை கட்டற்ற எலெக்ட்ரானின் நிறைக்குச் சமமாகவோ, வேறுபட்டோ இருக்கும். இதுபற்றிச் சற்றுவிரிவாய் இங்குக் காண்போம்.

ஓர் எலெக்ட்ரான் படிக அணிக்கோவையின் ஊடே இயங்குகிறதாயும், அதன் மின்னூட்டம் ‘q’ எனவும், அதன் நிறை (கட்டற்ற நிலையில்) ‘m’ எனவும் கொள்வோம். அதனை ξ என்னும் மதிப்புள்ள மின்புலச்செறிவு ஆட்கொள்வதாய்க் கொள்வோம். அதனால், மின்புலத்தால் எலெக்ட்ரானுக்கு வரும் முடுக்கத்தின் மதிப்பு,

$$a = \frac{q\xi}{m}.$$

மடக்குநிலை அணிக்கோவையில் எலெக்ட்ரானுக்குக் கிடைக்கும் முடுக்கத்தின் மதிப்பு மாறிலியாய் இராது. முடுக்கத்தின் மதிப்பில் ஏற்படும் மாற்றம், எலெக்ட்ரான் படிக அணிக்கோவையினூடே செல்லும்போது அதன் நிறைமாறுவதால் உண்டாகிறது என்று அறியலாம். ஏனெனில் மேலேகண்ட சமன்பாட்டில் q மற்றும் ξ ஆகியவை மாறிலிகளாகும். அதனால் மாறும் மதிப்புடைய கணியம் ‘m’ ஆகும். ஆகவே, ‘m’ க்குப் பதிலாய் ‘m*’ எனும் எலெக்ட்ரானின் செயலுறு நிறையை அச்சமன்பாட்டில் இட,

$$a = \frac{q\xi}{m^*}$$

அதனால், எலெக்ட்ரானின் மீதுள்ள மின்விசை

$$F = m^* a \qquad .. \quad (4.31)$$

இப்போது ஆற்றல் 'E', அலைவெக்டார் 'k' ஆகியவற்றில் m^* – க்குரிய ஒருசார்பினைக் காணப்போகிறோம்.

எலெக்ட்ரான் அலையின் திசைவேகம்,

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = 2\pi \frac{d\nu}{dk} = \frac{1}{\hbar}\frac{dE}{dk}$$

இதில் $E = h\nu$ என்று பயன்படுத்தப்பட்டுள்ளது.

$$a = \frac{dv_g}{dt} = \frac{1}{\hbar}\frac{d^2E}{dk\,dt} = \frac{1}{\hbar}\frac{d^2E}{dk^2}\frac{dk}{dt}$$

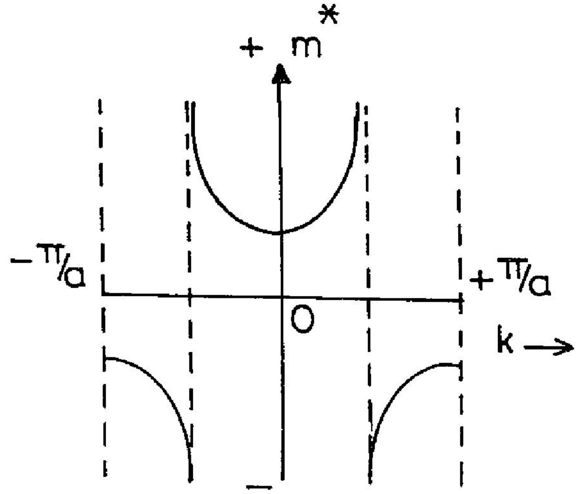
ஆனால், $$\frac{dk}{dt} = F/\hbar$$

அதனால், $$a = \frac{dv_g}{dt} = \frac{1}{\hbar^2}\frac{d^2E}{dk^2} . F$$

$$\therefore \; F = \frac{\hbar^2 \; a}{\frac{d^2 E}{dk^2}} \qquad .. \quad (4.32)$$

சமன்பாடுகள் (4.31) ஐயும் (4.32) ஐயும் ஒப்பு நோக்க,

$$m^* = \frac{\hbar^2}{\frac{d^2E}{dk^2}} \qquad (4.33)$$



படம் **4.15** செயலுறு நிறைக்கும் அலை வெக்டாருக்கும் இடையே வரையப்பட்டவரை.

படம் 4.15இல் செயலுறு நிறை m*– க்கும், அலைவெக்டார் k - க்கும் இடையே வரையப்பட்டுள்ள வரை காட்டப்பட்டுள்ளது. ஆற்றல்பட்டையின் கீழ்ப்பாதியில் m^* நேர்க்குறியுடையதாயும், மேற்பாதியில் அஃது எதிர்க்குறியுடையதாயும் மாறுகிறது. அஃதாவது, $k = 0$ என இருந்து ஒரு மின்புலத்தை எலெக்ட்ரான்மீது செலுத்தினால் அலைவெக்டாரின் மதிப்பு, நேரம் உயரஉயர, அதன் மதிப்பும் உயர்கிறது. திசைவேகம் பெரும மதிப்பிற்கு வரும்வரை இவ்வாறுநிகழும். $d^2E/dk^2 = 0$ என்னும் இடத்தில் பெருமத் திசைவேகம் உண்டாகிறது. அதற்குப்பின் எலெக்ட்ரானின் ஆற்றல், மேலும் உயரும்போது அதன் திசைவேகம் குறைகிறது. அஃதாவது, எலெக்ட்ரான் எதிர்க் குறியுடைய நிறையுள்ள துகளாக நடந்து கொள்கிறது. உலக வழக்கில் எதிர்க்குறியுடைய நிறையுள்ள துகள் இல்லை என்பதால் அதனை நேர்க்குறியுடைய மின்னூட்டமுள்ள துகளாக எடுத்துக்கொள்கிறோம். அதனால் ஆற்றல் பட்டையின் மேற்பாதியில் எலெக்ட்ரான் நேர்மின்னூட்டம் பெற்ற துகள்போல் விளங்குகிறது. அதனையே நாம் ‘துளை’ என்கிறோம். இந்நிகழ்ச்சி எளிய உலோகங்களில் அவ்வளவு முக்கியத்துவம் பெறாது. ஏனெனில், அவைகளில் எல்லாம் ஆற்றல்பட்டையின் கீழ்ப்பாதிதான் நிரப்பப்பட்டுள்ளது. ஆனால், ஆற்றல்பட்டை ஏறத்தாழ நிரம்பிய நிலையில் உள்ள பொருள்களில் மேல்மட்ட ஆற்றல்நிலைகளில் சில எலெக்ட்ரான்கள் இருக்கும். அதனால், அந்த எலெக்ட்ரான்களுக்கு எதிர்நிறையே இருக்கும். இவ்வகைப் பொருள்களின் பண்புகள் எதிர்நிறை எலெக்ட்ரான்களைச் சார்ந்துள்ளன. ஏனெனில், அந்த எலெக்ட்ரான்கள் ஃபெர்மி புறப்பரப்பிற்கு அருகில் உள்ளன.

துளை பற்றிய பொதுவான கருத்தைச் சற்று விரிவாகக் காண்போம். அஃதாவது, ஆற்றல்பட்டையின் மேல்மட்டத்தில் ஓர்ஆற்றல்நிலை தவிர, அனைத்து ஆற்றல் நிலைகளும் நிரம்பிவிட்டதாய்க் கொள்வோம். மின்புலத்தைச் செலுத்தும் போது எலெக்ட்ரான் ஒன்று பட்டையின் அடியிலிருந்து வந்து இந்தக் காலியான ஆற்றல் நிலையை நிரப்பும். அதனால், பட்டையின் உள்ளே ஒரு காலியான ஆற்றல் நிலை

ஏற்படுகிறது. இவ்வாறு பட்டையின் உள்ளே காலியாகும் ஆற்றல்நிலை. பட்டையின் மேல்பகுதியிலிருந்து கீழ்நோக்கிய திசையில் எவ்வளவு தூரத்தில் உள்ளது என்பது நாம் செலுத்தும் மின்புலத்தின் மதிப்பினைச் சார்ந்துள்ளது. அதனால் மின்புல விளைவால் நிரமபப்பட்ட பகுதியில் இருந்து ஓர் எலெக்ட்ரான் மேல்நோக்கி, காலியான ஆற்றல்நிலைக்கு சென்றால் உடனே அங்குள்ள காலியிடம் ஒன்று, கீழ்நோக்கி வந்து நிரப்பப்பட்ட ஆற்றல்நிலைகளில் காலியிடம் ஒன்றனை ஏற்படுத்தும். அதனால், மின்புல விளைவை காலியிடம் நகர்வதைக் கொண்டுவிளக்க முடியும். இந்தக் காலியிடத்தையே நாம் துளை என்கிறோம். நடைமுறையில் ஏறத்தாழ நிரப்பப்பட்ட பட்டையைப்பற்றிப்பேசும்போது அதிலுள்ள அதிகமான எலெக்ட்ரான்களை எடுத்துக்கொள்வதைவிட அதன் சில துளைகளை எடுத்துக்கொள்வது மிக எளிதாயிருக்கும். அத்துளைகளின் இயக்கம் அப்பட்டையின் அனைத்து எலெக்ட்ரான்களின் இயக்கத்திற்குச் சமமாயிருக்கும். மேலும், ஒருபொருளின் இணைதிறப் பட்டையில் இத்தகைய காலியிடங்கள் இருந்தால் அப்பொருளின் மின்கடத்துந்திறன் கூடுகிறது. ஏனெனில், இணைதிறப் பட்டையிலுள்ள எலெக்ட்ரான்கள் இத்தகைய காலியிடங்களுக்குப்பெயர்வு கொள்ள முடியும். குறைகடத்திகளில் இணைதிறப்பட்டையின் மேல்மட்டத்தில் சில காலியிடங்கள் இருக்கும். இக்காலியிடங்கள் அல்லது துளைகள், எலெக்ட்ரான்கள் போல் மின்னூட்டக் கடத்திகளாய் விளங்குகின்றன. அதனால் குறைகடத்திகளில் எலெக்ட்ரான்கள், துளைகள் என இருவகை மின்னூட்டக் கடத்திகள் உள்ளன. துளைகளின் பண்புகள்பற்றிக் கீழே காண்போம்.

முழுதுமாக நிரப்பப்பட்ட இணைதிறப் பட்டையில் மின்னோட்ட அடர்த்தி,

$$J_e = -n\,e \langle v \rangle$$

இதில் - e என்பது எலெகட்ரானின் மின்னூட்டம்; $n\langle v \rangle$ என்பது இணைதிறப்பட்டையில் உள்ள அனைத்து எலெக்ட்ரான்களின் திசைவேகக் கூட்டுத் தொகையாகும்.

அஃதாவது,
$$n\langle v \rangle = \sum_{i=1}^{n} v_i = 0$$

ஏனெனில், அப்பட்டை நிரப்பப்பட்டதாய் உள்ளது. இப்போது அப்பட்டையின் மேல்மட்டத்தில் ஒருகாலியிடம் ஏற்பட்டுள்ளதாய்க் கொள்வோம். அதன் திசை வேகம் v_h என்க.

அதனால்,
$$n\langle v \rangle = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq h}}^{n} v_i + v_h$$

$$\therefore \sum_{i=1}^{n} v_i = 0 = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq h}}^{n} v_i + v_h$$

(அல்லது) $$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq h}}^{n} v_i = -v_h$$

இச்சமன்பாட்டின் இடப்பக்கப் பகுதி, இணைதிறப் பட்டையிலுள்ள ஒரேயொரு துளை தவிர, மற்றைய அனைத்து எலெக்ட்ரான்களின் திசைவேகக் கூட்டுத் தொகையாகும். அதனால், துளையின் திசைவேகம் அனைத்து எலெக்ட்ரான்களின் திசைவேகக் கூட்டுத் தொகைக்குச் சமமாகவும், அது எலெக்ட்ரான்களுக்கு எதிர்த்திசையில் இயங்குவதாகவும் உள்ளது. அதனால் துளை, நேர்மின்னூட்டம் கொண்ட மின்னூட்டக் கடத்திபோல் நடந்து கொள்கிறது. அதனால், ஒரு துளையின் மூலம் கிடைக்கும் மின்னோட்ட அடர்த்தி,

$$J_h = e\, v_h$$

அதனால், ஒருதுளை மூலம் வரும் மின்னோட்டம், இணைதிறப் பட்டையிலுள்ள அனைத்து எலெக்ட்ரான்களின் மூலம் வரும் மின்னோட்டத்திற்குச் சமமாகும். அதனால், கணக்கீடுகளைத் துளைக்கருத்தியல் மூலம் செய்யும்போது நமக்குஅவை எளிதாயிருக்கின்றன. துளைக் கொள்கை மூலம் தாம்சன் (Thomson) விளைவு, ஹால் (Hall) விளைவு போன்ற பல நிகழ்ச்சிகளை எளிதாய் விளக்கமுடியும்; மேலும், பரிசோதனைகளின் மூலம் கண்டுபிடிக்கப்பட்ட பெயர்வு உலோகங்களின் (transition metals) எலெக்ட்ரானிய தன்வெப்ப ஏற்புத்திறனின் மிகுந்த மதிப்பினையும், அவற்றின் மிகுந்த பாராக் காந்த ஏற்புத்திறனையும் விளக்க முடியும். இப்போது மின்புல விளைவால் துளைமின்னோட்டம் நேரத்திற்கு ஏற்ப எங்ஙனம் மாறுகிறது என்று காண்போம்.

$$\frac{dI}{dt} = e\,\frac{dv_h}{dt} = \frac{-e^2\xi}{m_h^*}$$

இதில் $\frac{dv_h}{dt} = \frac{-e\xi}{m_h^*}$ ஆகும்.

துளை, ஏறத்தாழ நிரப்பப்பட்ட பட்டையின் மேல்மட்டத்தில் இருப்பதால் அதன் m_h^* எதிர்க்குறியுடையதாயிருக்கும். அதனால், $\frac{dv_h}{dt}$ என்பது நேர்க்குறியுடையதாகவே இருக்கும்.

$$\therefore \frac{dv_h}{dt} = \frac{e\xi}{|m_h^*|}$$

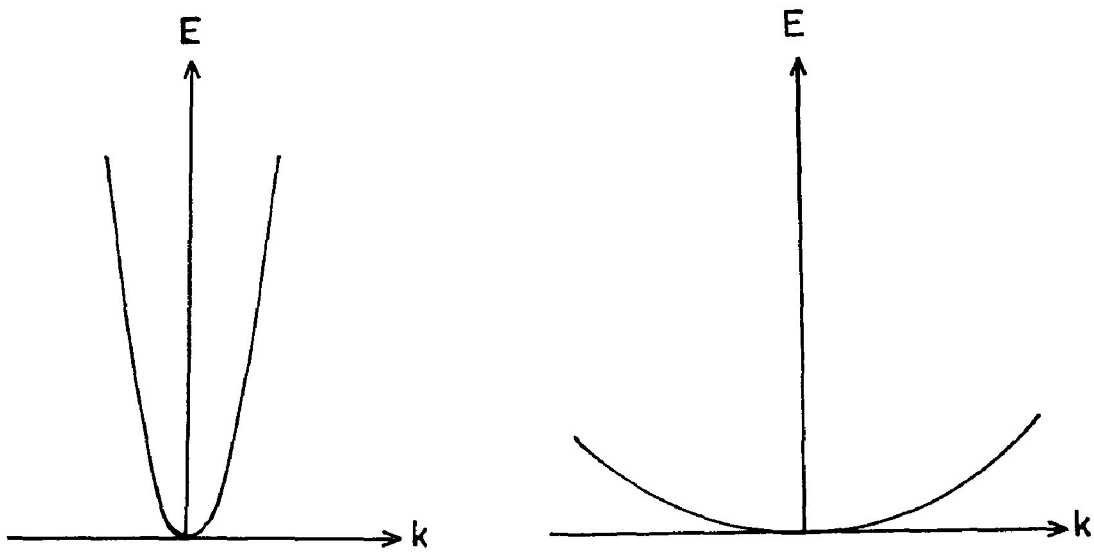
மின்னூட்டத்தின் குறியானது நிறையின் குறியோடு நன்கு பொருந்தியிருக்க வேண்டும் என்பது மேலேயுள்ள சமன்பாடு மூலம் தெரியவருகிறது. இதில் 'e' என்பது நேர்க்குறியுடையது. அதனால், $|m_h^*|$ ம் நேர்க்குறி உடையதாய் இருக்கும். அதனால், ஏறத்தாழ நிரப்பப்பட்ட இணைதிறப் பட்டையிலுள்ள எலெக்ட்ரான்களின் பண்புகளை

அதன்கண் உள்ள நேர்க்குறியுடைய நிறையையும், நேர்க்குறியுடைய மின்னூட்டத்தையும் உடைய துளைகளின்மூலம் விளக்க முடியும்.

துளைகள், எலெக்ட்ரான்கள் அல்லது பாஸிட்ரான்கள் போன்ற மெய்யான துகள்கள் அல்ல. ஆனால், அவை மண்டல விளிம்புகளின் கண் உள்ள எலெக்ட்ரான்களின் எதிர்நிறைக் குணத்தை அறிந்துக்கொள்வதற்காக ஏற்படுத்தப்பட்டவையாகும். அதனால், செயலுறுநிறையுள்ள எதிர்நிறை எலெக்ட்ரானின் இயக்கம் நேர்க்குறி நிறையுள்ள துளையின் இயக்கத்திற்கு அல்லது ஏறத்தாழ நிரம்பிய நிலையில் உள்ள பட்டையின் காலியிடத்தின் இயக்கத்திற்குச் சமமாகும். எதிர் நிறையுள்ள ஓர் எலெக்ட்ரானின் மின் கடத்தலும், நேர்நிறையுள்ள துளையின் மின் கடத்தலும் சமமாகும்.

அலைவெக்டாரின் மதிப்பு ‘k’ யிலிருந்து ‘$k + \Delta k$’ என்ற மதிப்பிற்கு மாறும்பொழுது, அணிக்கோவையிலிருந்து எலெக்ட்ரானுக்குச் செல்லும் உந்தப் பரிமாற்றம் (momentum transfer) எதிராகவும், செலுத்தப்பட்ட விசையிலிருந்து எலெக்ட்ரானுக்குச் செல்லும் உந்தப்பரிமாற்றத்தைவிட மிகுதியாயும் உள்ளது. இந்நிலையில் பிராக் பிரதிபலிப்பு (Bragg reflection) எலெக்ட்ரானின் முன்னோக்கிய உந்தத்தைக் குறைத்தபின்தான் நிகழமுடியும். இவ்வாறு இந்நிகழ்ச்சி ஏற்பட்டால் அந்த எலெக்ட்ரானின் செயலுறுநிறை எதிர்க்குறியுடையதாய் விளங்கும்.

இவ்வாறு எலெக்ட்ரானின் செயலுறுநிறை என்பது ஒருபுதிய கருத்தாகும். அது எலெக்ட்ரான் அலை பெட்டகத்திற்கும் (wave packet) மடக்குநிலை அணிக்கோவைக்கும்



(அ) (ஆ)

(அ) செயலுறுநிறைகனமற்றதாயிருக்கும் போதுள்ள ஆற்றல்வரை

(ஆ) செயலுறுநிறைகனமாயிருக்கும் போதுள்ள ஆற்றல் வரை

படம் 4.16 செயலுறு நிறையால் ஆற்றல் வரையில் ஏற்படும் மாற்றம்.

இடையே ஏற்படும் இடை வினையால் ஏற்படுகிறது. செயலுறு நிறையின் மதிப்பு அதிகமாய் இருக்கும்போது எலெக்ட்ரான் ஒரு கனமான துகளாய் நடந்துக்கொள்ளும். $m = m^*$ என இருந்தால் அந்த எலெக்ட்ரான் மிகப்பழைய கொள்கையில் உள்ள கட்டற்ற எலெக்ட்ரான் போல் நடந்துகொள்ளும்.

பல கடத்திகளில் $m^* \approx m$; ஏனெனில், அவற்றின் இணைதிறப் பட்டையின் ஒருபகுதிதான் நிரம்பியிருக்கும். அதனால் செயலுறுநிறையின் முக்கியத்துவம் குறைகடத்திகளிலும், மின்கடத்தாப் பொருள்களிலும் மட்டுமே உள்ளது. இவ்வகைப் பொருள்களில் இணைதிறப்பட்டை முழுதுமாகவோ, ஏறத்தாழ நிரப்பப்பட்டோ இருக்கும். துளையின் இயற்பியற் குணங்கள், பட்டையில் உள்ள எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கையைப் பொறுத்தன. குறைகடத்திகளில் அறை வெப்பநிலையில் குறைந்த அளவுள்ள எலெக்ட்ரான்கள் கடத்துப் பட்டையின்கண் இருக்கும். அதனால் அதே அளவுள்ள காலியிடங்கள் இணைதிறப் பட்டையின்கண் இருக்கும். இணைதிறப்பட்டையின் மேலே உள்ள காலியிடங்களே துளைகள் என அழைக்கப்படும். எலெக்ட்ரான்களைப் போலவே இத்துளைகளும் மின்கடத்தலில் பங்கெடுக்கின்றன. உலோகங்களில் எலெக்ட்ரான்கள் மட்டுமே மின்னூட்டக் கடத்திகளாயிருக்கும். ஆனால், குறைகடத்திகளில் எலெக்ட்ரான்–துளை இரட்டைகள் வெப்ப அயனியாக்க முறையில் தோன்றுகின்றன. அதனால் வெப்பநிலை உயரஉயர எலெக்ட்ரான்களும், துளைகளும் மிகுந்த அளவில் தோன்றி மின்னூட்டக்கடத்திகளின் செறிவு மிகுதியாகிறது. அதேநேரத்தில் உலோகங்களில் வெப்பநிலை உயர்ந்தால் அணிக்கோவை சிதறல்கள் அதிகமாகி அதன் காரணமாய் எலெக்ட்ரான்களின் நகர்திறன் (mobility) குறைந்துவிடும்; அதனால், மின்கடத்துந்திறன் மதிப்புக் குறைகிறது.

மாதிரிக் கணக்குகள்

1. கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்கள் 1 கன செ.மீ. உள்ள கனசதுர திண்மத்தில் உள்ளன என எடுத்துக்கொள்வோம். அவற்றில் $n_x = n_y = n_z = 1$ என்ற ஆற்றல் மட்டத்திற்கும் அதற்கு அடுத்து மேலுள்ள ஆற்றல் மட்டத்திற்கும் உள்ள ஆற்றல் வேறுபாட்டைக் கணக்கிடுக.

$$E = \frac{h^2}{8ma^2}\left(n_x^2 + n_y^2 + n_z^2\right);$$

$a = 10^{-2}$ மீ என்று கொடுக்கப்பட்டுள்ளது.

$$E_1 = \frac{(6.626 \times 10^{-34})^2\,(1^2 + 1^2 + 1^2)}{8 \times 9.109 \times 10^{-31} \times (10^{-2})^2} = 1.81 \times 10^{-33} \text{ ஜூல்.}$$

இந்த ஆற்றல் நிலைக்கு மேலே (1, 1, 2), (1, 2, 1) (2, 1, 1) போன்ற பல ஆற்றல் நிலைகள் உள்ளன. இவ்வாற்றல் நிலைகளுக்கு

$$E_2 = \frac{(6.626 \times 10^{-34})^2 \times (1^2 + 1^2 + 2^2)}{8 \times 9.109 \times 10^{-31} \times (10^{-2})^2} = 3.62 \times 10^{-33} \text{ ஜூல்}$$

அதனால் ஆற்றல் வேறுபாடு $= E_2 - E_1 = 1.81 \times 10^{-33}$ ஜூல் ஆகும்.

2. இயக்க ஆற்றல் 100 எலெக்ட்ரான்வோல்ட்டு உள்ள எலெக்ட்ரானின் அலை நீள மதிப்பு யாது?

இயக்க ஆற்றல் $= \frac{1}{2} mv^2$. எனவே $v = \sqrt{\frac{2 \times \text{இயக்க ஆற்றல்}}{m}}$

$$\therefore\ v = \sqrt{\frac{2 \times 100 \times (1.6 \times 10^{-19})}{9.1 \times 10^{-31}}}$$

$= 5.9 \times 10^6$ மீட்டர்/செகண்டு

$\therefore\ p = mv = 9.1 \times 10^{-31} \times 5.9 \times 10^6 = 5.4 \times 10^{-24}$ கிலோ கிராம் மீ/செகண்டு

$$\text{எனவே } \lambda = \frac{h}{p} = \frac{6.6 \times 10^{-34}}{5.4 \times 10^{-24}} = 1.2 \times 10^{-10} \text{ மீட்டர் } = 1.2\ \text{Å}$$

3. முறையே 150 வோல்ட்டு, 15000 வோல்ட்டு உள்ள மின்அழுத்த வேறுபாடுகளில் ஓர் எலெக்ட்ரான் முடுக்கப்பட்டால் அந்த எலெக்ட்ரானுக்குக் கிடைக்கும் அலை நீளங்களின் மதிப்புகள் யாவை ?

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV$$

$$\therefore\ v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}\ ;\ \text{மேலும் } \lambda = \frac{h}{mv}$$

$$\lambda = \frac{h}{m\sqrt{\frac{2eV}{m}}} = \frac{h}{\sqrt{2\,eVm}}$$

$$= \frac{6.62 \times 10^{-34}}{(2 \times 1.602 \times 10^{-19} \times 9.11 \times 10^{-31} \times V)^{1/2}} \text{ மீ}$$

$$= \frac{12.25}{\sqrt{V}}\ \text{Å}$$

அதனால், $V = 150$ வோல்ட்டு எனில் $\lambda = 1$ Å

$V = 15000$ வோல்ட்டு எனில் $\lambda = 0.1$ Å

4. 400 வோல்ட்டு ஆற்றல் உள்ள எலெக்ட்ரான்களால் ஒரு படிகத்தில் ஏற்படும் விளிம்பு விளைவின் வடிவம் 0.61 ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகு அலைநீளமுள்ள எக்ஸ் கதிர்களால் அப்படிகத்தில் ஏற்படும் விளிம்பு விளைவின் வடிவத்திற்குச் சமமாயுள்ளது. இதனைப் பயன்படுத்திப்பிளாங்கின் மாறிலியைக் கணக்கிடுக.

$$\lambda = \frac{h}{mv} \text{ மற்றும் } mv = \sqrt{2meV}$$

$$\therefore \lambda = \frac{h}{\sqrt{2\ meV}}$$

$$h = \lambda\sqrt{2\ meV} = 0.61 \times 10^{-10} (2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 9.11 \times 10^{-31} \times 400)^{1/2}$$

$$= 6.58 \times 10^{-34} \text{ ஜூல்-செகண்டு}$$

சுருக்கம்

1. உலோகங்கள் பற்றிய எலெக்ட்ரான் கொள்கை மிகப்பழைய கட்டற்ற எலெக்ட்ரான் கொள்கை, கவளக்கட்டற்ற எலெக்ட்ரான் கொள்கை, மண்டலக் கொள்கை என மூன்று வகைப்படும். மிகப்பழைய கொள்கையில் மிகுதியான குறைபாடுகள் உள்ளன. கவளக் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான் கொள்கைமூலம் திண்மப் பொருள்களின் மின் பண்பு, வெப்பப்பண்பு ஆகியவற்றைப் பற்றி நன்கு தெரிந்து கொள்ளலாம். எனினும், நடைமுறை மதிப்புகளுக்கும், கவளக் கொள்கை மதிப்புகளுக்கும் சிறிது வேறுபாடு உள்ளது. இஃது எலெக்ட்ரானின் செயலுறு நிறையால் விளைகிறது.

2. எலெக்ட்ரான் அணிக்கோவை மின்னழுத்தத்தில் இயங்கும்போது அதன் நிறை, செயலுறுநிறை என அழைக்கப்படும். இதன் காரணமாய்ச் சில நேர்வுகளில் எலெக்ட்ரானுக்கு எதிர் நிறை கூடக்கிடைக்கும்.

3. அணிக்கோவையில் எதிர்நிறையுள்ள எலெக்ட்ரானைத் துளை என்கிறோம். அது நேர்நிறையும், நேர் மின்னூட்டமும் கொண்டது. எனினும், அஃது உண்மைத்துகள் இல்லை.

4. விளிம்பு விளைவுக்கு உட்படும் அலை வெக்டாரின் மதிப்புகளைத்தரும் ஆற்றல்கள் படிகத்தில்விலக்கப்பட்ட ஆற்றல்களாகும். இவ்வாறு ஒரு திண்மத்திலுள்ள எலெக்ட்ரான்கள் அனுமதிக்கப்பட்ட ஆற்றல்களை மட்டும்

பெற முடியும் ; விலக்கப்பட்ட ஆற்றல்களின் மதிப்பினை அவைகள் பெற முடியாது. இவ்வாறு ஒரு திண்மப் பொருளில் ஆற்றல் இடைவெளி தோன்றுகிறது.

5. இரு ஒரேவகை அணுக்கள் ஒன்றனையொன்று மிக நெருக்கமாய் இருக்கும் போது அணுவின் ஆற்றல் மட்டங்களில் பிரிகை நடைபெறுகின்றன. ஒருதிண்மப் பொருளில் 'N' அணுக்கள் இருந்தால் ஒவ்வொரு அணுமட்டமும் 'N' மட்டங்களாய்ப் பிரியும். இந்த 'N' மட்டங்கள் மிக நெருக்கமாய் அமைந்து, ஆற்றல் பட்டையாய் மாறுகிறது.

6. உலோகங்களில் ஆற்றல் இடைவெளி இல்லை. ஆனால், குறைகடத்திகளில் குறைந்த மதிப்புள்ள ஆற்றல் இடைவெளியும், மின்கடத்தாப் பொருள்களில் மிகுந்த மதிப்புள்ள ஆற்றல் இடைவெளியும் உள்ளன.

7. ஒரு திண்மப் பொருளின் மண்டல வெளியில் ஃபெர்மி புறப்பரப்பு நன்கு நகரமுடியுமானால் அது நல்லதொரு கடத்தியாகும். அவ்வாறில்லா விட்டால் அது குறைகடத்தியாகவோ, மின்கடத்தாப் பொருளாகவோ இருக்கும். மின்கடத்தாப் பொருள்களில் ஃபெர்மி புறப்பரப்பால் சிறிதளவு கூட நகர முடியாது.

8. அலைவெக்டார் 'k' யின் அனுமதிக்கப்பட்ட மதிப்புகளை முப்பரிமாணத்தில் காட்டுவதே பிரில்லாவின் மண்டலமாகும். இதன்மூலம் பொருள்களின் மின் பண்புகள், வெப்பப்பண்புகள் ஆகியவற்றைத் தெரிந்து கொள்ளலாம்.

வினாக்கள்

1. மிகப்பழையகட்டற்ற எலெக்ட்ரான் கொள்கையின் முக்கியச் சரத்துகளையும் அதிலுள்ள குறைபாடுகளையும் விரிவாய் எழுதுக.

2. ஷ்ரோடிங்கரின் நேரம் சார்ந்திரா அலைச்சமன்பாட்டைத் தருவித்து, அதன் மூலம் ஒரு வரையிலி ஆழமுடையதும் அதே சமயம் குறிப்பிட்டஅளவு அகலமுடையதுமான ஒரு மின்னழுத்தக் கிணற்றுக்குள் உள்ள எலெக்ட்ரானின் ஆற்றல் மட்டங்களின் மதிப்புகளைக் கணக்கிட உதவும் சமன்பாட்டையும் தருவி.

3. பிரில்லாயின் மண்டலங்கள் என்றால் என்ன? அவை மூலம் உலோகங்களின் மின்கடத்துத்திறனை எவ்வாறு விளக்குவாய்?

4. கடத்திகள், குறைகடத்திகள், மின்கடத்தாப் பொருள்கள் ஆகியவற்றை எவ்வாறு வேறுபடுத்திக் காட்டலாம்? உதாரணங்கள் கொடுத்து நன்கு விளக்குக.

5. செயலுறுநிறை என்றால் என்ன? எலெக்ட்ரானின் செயலுறு நிறைக்குரிய சமன்பாட்டைத் தருவித்து, அதனை விளக்குக. துளைபற்றிய கருத்து, செயலுறு நிறைமூலம் எவ்வாறு வருகிறது என்பதையும் கூறுக.

6. சிறுகுறிப்பு வரைக :

அ) பருப்பொருள் அலைகள்

ஆ) ஃபெர்மி பகிர்வுக் கோவை

இ) ஃபெர்மி ஆற்றல்

ஈ) ஃபெர்மி புறப்பரப்பு

மேற்கோள் நூற்பட்டியல்

1 'Physics of Solids' – C.A. Wert and R.M. Thomson, Mc Graw Hill, New York, 1970.

2. 'The Science and Engineering of Materials' – Donald R. Askeland, PWS – KENT Publishing Company, Boston, 1989.

3. 'An Introduction to Solid State Physics and its applications' – R.J. Elliott and A.F. Gibson, The Macmillan Press Ltd, London, 1976.

4. 'Introduction to Solid State Physics' – C. Kittel, Wiley Eastern Limited, New Delhi, Fourth Reprint, 1985.

5. திண்மங்களின் வெப்பப் பண்புகள்

5.1 அறிமுகம்

திண்மங்களின் வெப்பப் பண்புகள், திண்மங்களின் வெப்பப் பரிமாற்றுக் குணங்களையும், வெப்பத் தடைகளையும் (thermal resistances) முடிவு செய்கின்றன. இவையெல்லாம் குறிப்பாய் பொதுவியல் (Civil), எந்திரவியல் பொறியாளர்களுக்கு மிக அவசியமானவையாகும். திண்மங்களின் வெப்பப் பண்புகளை விவரிக்க நமக்கு இருமுக்கிய கணியங்கள் தேவைப்படுகின்றன. அவை முறையே தன்வெப்ப ஏற்புத் திறன் (specific heat), வெப்பங் கடத்துந்திறன் (thermal conductivity) ஆகும். ஒரு பொருளை வெப்பப்படுத்தும் போது, பொருளின் வெப்பநிலை உயர்வு வீதத்தைத் தீர்மானிப்பது பொருளின் தன்வெப்பஏற்புத்திறனும், வெப்பங்கடத்துந்திறனுமாகும். தெவிட்டிய நிலைக்குப் பிறகு, அஃதாவது, பொருளின் வெப்பநிலை மாறாமல் இருக்கும் போது பொருளின் கண் எவ்வளவு வெப்பம் உட்செல்கிறது என்பதைத் தீர்மானிப்பது பொருளின் வெப்பங் கடத்துந்திறன் மட்டுமேயாகும். முதலாவதாய்த் தன்வெப்ப ஏற்புத்திறன் பற்றி விரிவாயும், அதற்குப்பின் வெப்பங் கடத்துந் திறனைப் பற்றியும் காண்போம்.

5.2 பருமன் மாறாத் தன்வெப்ப ஏற்புத்திறன் 'C_V'

தன்வெப்ப ஏற்புத் திறன் என்பது ஓரலகு நிறையுடைய பொருளின் வெப்பநிலையை ஒருகெல்வின் உயர்த்துதற்குத் தேவையான வெப்ப ஆற்றலாகும். வெப்ப ஏற்புத் திறன் (thermal capacity) என்பது ஒரு பொருளின் வெப்பநிலையை ஒருகெல்வின் உயர்த்துதற்குத் தேவையான வெப்ப ஆற்றலாகும். வாயுக்களுக்கு இருவகையான தன்வெப்ப ஏற்புத் திறன்கள் உள்ளன என்பது அனைவருக்கும் தெரிந்ததே. அவை பருமன் மாறாத் தன்வெப்பஏற்புத் திறன் (C_V) எனவும், அழுத்தம் மாறாத் தன்வெப்பஏற்புத் திறன் (C_P) எனவும் குறிக்கப்படும். திண்மப் பொருள்களில், வாயுக்களோடு ஒப்பிடும்போது பருமமாற்றம் புறக்கணிக்கத் தக்க அளவு குறைவாயிருப்பதால் C_P யைப் பற்றி நாம் இங்குக் காணப் போவதில்லை. நமது விவாதம் முழுவதும் C_Vயைக் குறித்தே இருக்கும்.

பருமன் மாறாமல் பொருளில் வெப்பநிலை 'dT' என்ற சிறு அளவு உயர, பொருளுக்குக் கொடுக்கப்படும் சிறு அளவு வெப்ப ஆற்றல் 'dQ' எனவும், அதேபோல் '∂T' என்ற மீச்சிறு வெப்பநிலை மாற்றத்தால் பொருளின் அக ஆற்றலில் (internal energy) ஏற்படும் மீச்சிறுமாற்றத்தை '∂U' எனவும் கொண்டால், பருமன் மாறாத் தன்வெப்ப ஏற்புத்திறனைப் பின்வருமாறு எழுதலாம்.

$$\left(\frac{dQ}{dT}\right)_V \equiv \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V \equiv C_V$$

C_V ஐ மோலார் தன்வெப்பஏற்புத்திறனாகவும் எடுத்துக்கொள்ளலாம். அஃதாவது, ஒரு மோல் நிறையுடைய பொருளின் வெப்பநிலையை ஒருகெல்வின் உயர்த்துதற்குத்

தேவையான வெப்ப ஆற்றல் மோலார் தன்வெப்பஏற்புத்திறன் (molar specific heat) 'C_V' எனப்படும்.

ஒரு திண்மத்திற்கு வெப்ப ஆற்றல் அளிக்கப்படும்போது அதன் அக ஆற்றல் உயருகிறது என்றால், அதன் அணிக்கோவை அதிர்வியக்க (vibrational motion) ஆற்றலும் மேலும், அதன் கடத்து எலெக்ட்ரான்களின் இயக்க ஆற்றலும் உயருகிறது என்று கொள்ளலாம். அதனால்,

$$U = U_{(\text{அணிக்கோவை})} + U_{(\text{எலெக்ட்ரான்})}$$

$$\therefore C_V = C_{V\,(\text{அணிக்கோவை})} + C_{V\,(\text{எலெக்ட்ரான்})}$$

என எழுதலாம். பெரும்பான்மையான திண்மங்களுக்கு அறை வெப்பநிலைகளில் அக ஆற்றலில் எலெக்ட்ரானிய ஆற்றலின் பங்கு மிகமிகக் குறைவானதால்,

$$U \approx U_{(\text{அணிக்கோவை})}$$

$$C_V \approx C_{V\,(\text{அணிக்கோவை})}$$

எனக் கொள்ளலாம். இங்ஙனம் எடுத்துக் கொள்வதற்குரிய முழுக் காரணத்தையும், $C_{V(\text{எலெக்ட்ரான்})}$ மதிப்பையும் பின்னர்க் காண்போம்.

தன்வெப்பஏற்புத்திறனில் அணிக்கோவையின் பங்கினைக் கணக்கிடுவதற்குத் திண்மங்களின் சரியான இயலமைப்பினை எடுத்துக்கொண்டு ஒருகுறிப்பிட்ட வெப்பநிலையில் அதன் அணிக்கோவை அகஆற்றல் எவ்வளவு என்று கணக்கிட வேண்டும். இது குறித்துப் பலவகையான கொள்கைகள் உள; அவற்றை ஒவ்வொன்றாய் இங்குக் காண்போம்.

5.3 தன்வெப்பஏற்புத்திறன் பற்றிய முதுபழங்கொள்கை (Classical theory of specific heat) அல்லது டியூலாங்-பெடிட் விதி (Dulong and Petit's law)

டியூலாங்-பெடிட் விதிப்படி, எந்தவொரு திண்மத்திற்கும், எந்த வெப்பநிலையிலும், பருமன்மாறாத் தன்வெப்பஏற்புத்திறனின் மதிப்பு 3R அல்லது 25 ஜூல்/மோல்/கெல்வின் ஆகும். இங்கு 'R' என்பது பொதுவாயு மாறிலி. இவ்விதியின்படி, C_V ஒருமாறிலி ஆகும்.

இதுபற்றிச் சற்று விரிவாய்க் காண்போம். முதுபழங்கொள்கைப்படி ஒருதிண்மத்தின் அணுக்கள் யாவும் அணிக்கோவையின் புள்ளிகளில் சமநிலை (equilibrium)களில் இருக்கும். அவற்றுள் ஓர் அணுவை, அணு இடைத்தொலைவைவிட மிகக் குறைவான தொலைவு இடப்பெயர்ச்சி அடையச்செய்து அதனைத் தன்னிச்சையாக விட்டுவிட்டால் அஃது அதன் சமநிலைப்புள்ளியை மையமாகக்கொண்டு சீரிசை அதிர்வுகளை (harmonic vibrations) மேற்கொள்ளும். அதனால் திண்மத்தில் ஒவ்வோர் அணுவையும் தனித்தனி அணுச்சீரிசை அலையியற்றியாக (atomic harmonic oscillator) எடுத்துக்கொள்ளலாம். இவை அனைத்தும் ஒரே அதிர்வெண்ணில் இயங்கும். இவற்றிற்குரிய இயக்கத்தை,

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{f}{m}x = -\omega^2 x \qquad (5.1)$$

என எழுதலாம், இதில் 'x' என்பது இடப்பெயர்ச்சியையும், m, அணுவின் நிறையையும், f, மீட்சி விசை மாறிலியையும் (restoring force constant), t, நேரத்தையும் குறிக்கும். மேலும் இதன் கோண அதிர்வெண் $\omega = \sqrt{\frac{f}{m}}$ ஆகும்.

$$\text{அதனால், அதிர்வெண் } \nu = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{f}{m}} \qquad (5.2)$$

எனவே அலைவு நேரம் $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{f}}$ ஆகும்.

இந்த அணு அலையியற்றிகள் முப்பரிமாணங்களிலும் (three dimensions) அதிர்வியக்கங்களைப் பெறலாம். ஒவ்வொரு பரிமாணத்திலும் ஓர் அணுஅலையியற்றியின் சராசரி ஆற்றல் '$\overline{E}$' என்றால், முப்பரிமாணங்களிலும் அதன் சராசரி ஆற்றல் $3\overline{E}$ எனக்கொள்ளலாம். அதனால், ஒரு கிலோ மோல் திண்மத்தில் 'N' அணுக்கள் இருந்தால், ஒரு கிலோ மோலின் மொத்த அணிக்கோவை ஆற்றல் $3N\overline{E}$ ஆகும். இதனை இங்குக் கணக்கிடுவோம்.

ஒரு பொருளின் மொத்த ஆற்றல் = இயக்க ஆற்றல் + நிலை ஆற்றல்

அதனால், ஓர் ஒற்றைப் பரிமாண சீரிசை அலையியற்றியின் ஆற்றல்,

$$E = \frac{p_x^2}{2m} + \frac{1}{2}fx^2 \qquad (5.3)$$

இதில் p_x, x என்பன முறையே ஒற்றைப் பரிமாண சீரிசை அலையியற்றியின் உந்தமும், இடப்பெயர்ச்சியும் ஆகும். மேலும், எல்லா அணுஅலையியற்றிகளின் ஆற்றல்கள் சமமாய் இரா. ஏனெனில், ஒவ்வோர் அணு அலையியற்றியும் வெவ்வேறு வீச்சுகளில் (amplitudes) அதிர்வு கொள்ளும்.

'$\overline{E}$' என்பது ஓர் ஒற்றைப் பரிமாண அணுஅலையியற்றியின் சராசரி ஆற்றல் எனவும், ஒரு கிலோ மோல் உள்ள திண்மப் பொருளில் உள்ள மொத்த அணுக்கள் 'N' எனவும் கொள்ள,

$$\overline{E} = \frac{\int_0^\infty E\,dN}{\int_0^\infty dN} \qquad (5.4)$$

புள்ளியியஎந்திரவியலின்(Statistical Mechanics)படி இங்கு dN என்பது ஆற்றல் E லிருந்து

$E + dE$ வரைக்கும் இடையே உள்ள ஆற்றல்களை உடைய ஒற்றைப் பரிமாண அணுஅலையியற்றிகளின் எண்ணிக்கையாகும். மேலும், அதன் மதிப்பு ஒரு குறிப்பிட்ட வெப்பநிலை Tயில் $e^{-E/kT}$க்கு நேர்விகிதத்தில் இருக்கும். இதில் 'k' என்பது போல்ட்ஸ்மேன் (Boltzmann) மாறிலியாகும். அதனால், சமன்பாடு (5.4)இல் Eயின் மதிப்பு, dNனின் மதிப்பு ஆகியவற்றை இட

$$\overline{E} = \frac{\int_0^\infty \int_0^\infty \left(\frac{p_x^2}{2m} + \frac{1}{2} fx^2\right) e^{(p_x^2/2m + 1/2\, fx^2)/kT}\, dp_x\, dx}{\int_0^\infty \int_0^\infty e^{-(p_x^2/2m + 1/2\, fx^2)/kT}\, dp_x\, dx} \tag{5.5}$$

$$\overline{E} = \frac{\int_0^\infty \int_0^\infty \frac{p_x^2}{2m} e^{-p_x^2/2mkT} e^{-fx^2/2kT}\, dp_x\, dx + \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{1}{2} fx^2 e^{-fx^2/2kT} e^{-p_x^2/2mkT}\, dx\, dp_x}{\int_0^\infty e^{-p_x^2/2mkT}\, dp_x \int_0^\infty e^{-fx^2/2kT}\, dx}$$

$$= \frac{\int_0^\infty e^{-fx^2/2kT}\, dx \int_0^\infty \frac{p_x^2}{2m} e^{-p_x^2/2mkT}\, dp_x}{\int_0^\infty e^{-fx^2/2kT}\, dx \int_0^\infty e^{-p_x^2/2mkT} dp_x} + \frac{\int_0^\infty e^{-p_x^2/2mkT}\, dp_x \int_0^\infty \frac{fx^2}{2} e^{-fx^2/2kT}\, dx}{\int_0^\infty e^{-fx^2/2kT}\, dx \int_0^\infty e^{-p_x^2/2mkT}\, dp_x}$$

$$= \qquad I \qquad + \qquad II$$

இதில், முதற்பகுதியாய, $$I = \frac{\int_0^\infty \frac{p_x^2}{2m} e^{-p_x^2/2mkT}\, dp_x}{\int_0^\infty e^{-p_x^2/2mkT}\, dp_x} \tag{5.6}$$

இரண்டாம் பகுதியாய, $$II = \frac{\int_0^\infty \frac{fx^2}{2} e^{-fx^2/2kT}\, dx}{\int_0^\infty e^{-fx^2/2kT}\, dx} \tag{5.7}$$

முதலில் முதற்பகுதியைத் தீர்ப்போம். $p_x = u$ எனவும், $\frac{1}{2mkT} = \alpha$ எனவும் வை.

$$\therefore I = \frac{1}{2m}\frac{\int_0^\infty u^2 e^{-\alpha u^2}du}{\int_0^\infty e^{-\alpha u^2}du} = \frac{-1}{2m}\frac{\int_0^\infty \frac{u}{2\alpha}d(e^{-\alpha u^2})}{\int_0^\infty e^{-\alpha u^2}du}$$

$$= -\frac{1}{4m\alpha}\frac{\int_0^\infty u\, d(e^{-\alpha u^2})}{\int_0^\infty e^{-\alpha u^2}du}$$

பகுதிகளின் மூலம் தொகையத்தைத்தீர்ப்பது (integration by parts) என்ற முறையைப் பயன்படுத்தி மேற்கண்ட தொகையங்களைத் தீர்க்கலாம். அஃதாவது,

$$\int u\, dv = uv - \int v\, du$$

$$\therefore I = -\frac{1}{4m\alpha}\frac{\left\{(u e^{-\alpha u^2})\Big|_0^\infty - \int_0^\infty e^{-\alpha u^2}du\right\}}{\int_0^\infty e^{-\alpha u^2}du}$$

$$= +\frac{1}{4m\alpha}\frac{\int_0^\infty e^{-\alpha u^2}du}{\int_0^\infty e^{-\alpha u^2}du} = \frac{1}{4m\alpha} = \frac{2mkT}{4m} = \frac{1}{2}kT$$

இரண்டாம் பகுதியையும் இதே முறையைப் பின்பற்றித் தீர்க்கலாம். இங்கு $x = u$ எனவும், $\frac{f}{2kT} = \alpha$ எனவும் வைக்க,

$$II = \frac{\frac{f}{2}\int_0^\infty u^2 e^{-\alpha u^2}du}{\int_0^\infty e^{-\alpha u^2}du}$$

$f/2$–ஐத் தவிர்த்துப் பார்த்தால் இது முதற்பகுதி I யிலுள்ள தொகையம் போல் உள்ளது.

அதனால் இதனைத் தீர்க்க நமக்குக் கிடைப்பது,

$$II = \frac{f}{2}\frac{1}{2\alpha} = \frac{f \cdot 2kT}{4f} = \frac{1}{2}kT$$

அதனால்,

$$\overline{E} = I + II = \frac{1}{2}kT + \frac{1}{2}kT = kT \tag{5.8}$$

முன்பே கூறப்பட்டுள்ளபடி ஒவ்வோர் அணுஅலையியற்றிக்கும் மூன்று உரிமைப்படிகள் (degrees of freedom) முப்பரிமாண அதிர்வியக்கங்களால் வருகின்றன. அதனால், ஒரு கிலோ மோல் உள்ள திண்மப் பொருளின் அணிக்கோவை அதிர்வியக்க ஆற்றல் $U = 3N\overline{E}$. சமன்பாடு (5.8) இன் மூலம் $\overline{E}$ இன் மதிப்பை இதில் இட,

$$U = 3NkT = 3RT \tag{5.9}$$

இங்கு அணிக்கோவை அதிர்வியக்க ஆற்றலைப் பொருளின் அக ஆற்றல் என எடுத்துக் கொள்ளப்பட்டிருக்கிறது; மேலும், $Nk = R$ (பொது வாயு மாறிலி) ஆகும். சமன்பாடு (5.9)ஐ வகையீடு செய்ய, பொருளின் பருமன்மாறாத் தன்வெப்ப ஏற்புத்திறன்,

$$\boxed{C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V = 3R} \tag{5.10}$$

அஃதாவது, $C_V = 25$ ஜூல்/மோல்/கெல்வின் ஆகும்.

முடிவுகள் :

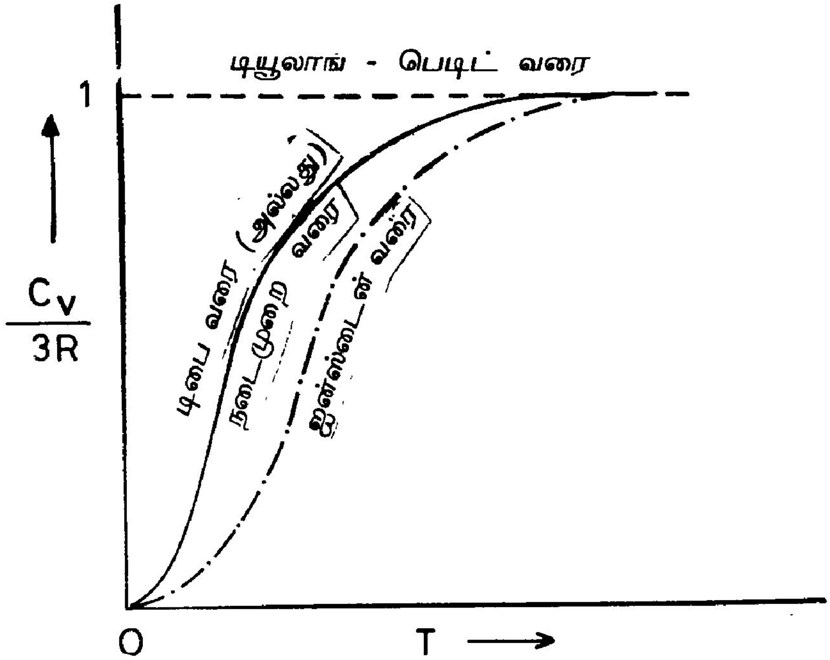
1. உயர்வெப்பநிலைகளில் மட்டும் முதுபழங்கொள்கையின் C_V மதிப்பும், சோதனை முறைகளில் கண்டுபிடிக்கப்பட்ட C_V யின் மதிப்பும் சமமாய் இருக்கின்றன. ஆனால், மிகக் குறைந்த வெப்பநிலைகளில் படம் 5.1 இல் காட்டியபடி இவ்விரண்டு மதிப்புகளுக்கும் இடையே ஏராளமான இடைவெளி இருக்கிறது.

2. மேலும் பின்வரும் நிகழ்ச்சிகளுக்குரிய காரணங்களை அக்கொள்கையால் விளக்க முடியவில்லை.

(i) மிகக் குறைந்த வெப்பநிலைகளில் உலோகப் படிகங்களுக்குப் பருமன் மாறாத் தன்வெப்பஏற்புத் திறன், பொருளின் வெப்பநிலைக்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது.

அஃதாவது, $C_V \alpha T$.

(ii) மிகமிகக் குறைந்த வெப்பநிலைகளில் அலோகப் படிகங்களுக்குப் பருமன் மாறாத்தன்வெப்ப ஏற்புத்திறன், பொருளின் வெப்பநிலையின் மும்மடிக்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது.



படம் 5.1 பருமன்மாறாத் தன்வெப்ப ஏற்புத்திறனில் வெப்ப மாறுதலால் ஏற்படும் மாற்றம்

அஃதாவது, $T \to 0\,K, C_V \,\alpha\, T^3$

(iii) நேர்மின் தனிமங்களாய சோடியம், மக்னீசியம், கால்சியம் போன்றவைகளுக்கு, வெப்பநிலை உயரஉயர, அவற்றின் பருமன் மாறாத் தன்வெப்ப ஏற்புத்திறன்களின் மதிப்பும் உயர்ந்து, $3R$ ஐ விட அதிகமாயிருக்கின்றன.

(iv) மென்மையானதும், உயர்உருகுநிலை (melting point) உடையதுமாய போரான், கார்பன், சிலிக்கான் போன்றவற்றில் பருமன்மாறாத் தன்வெப்ப ஏற்புத்திறனின் மதிப்பு $3R$ க்கும் குறைவாயுள்ளது.

இந்நிகழ்ச்சிகள் யாவும் டியூலாங்-பெடிட் விதிக்கு மாறாயும், அதனால், அணிக்கோவை அதிர்வுகள் பற்றிய முதுபழங்கொள்கைக்கு முரணாயும் இருப்பதனைச் சுட்டிக்காட்டுகின்றன.

5.4 தன்வெப்பஏற்புத்திறன் பற்றிய ஐன்ஸ்டைன் கொள்கை (Einstein's theory of specific heat)

தன்வெப்பஏற்புத்திறன் பற்றிய முதுபழங்கொள்கைக்கும் நடைமுறைக்கும் நிறைய வேறுபாடுகள் இருப்பதுபற்றிச் சென்ற பகுதியின் இறுதியில் கண்டோம். இக்குறைகளைக் களைய 1907 ஆம் ஆண்டில் ஐன்ஸ்டைன், பிளாங்கினது கவளக் கொள்கையை(quantum theory)ப் பயன்படுத்திப் புதியதொரு கொள்கையை உருவாக்கினார். அதன் மூலம் திண்மப் பொருள்களின் தன்வெப்பஏற்புத்திறனுக்கும், பொருளின் வெப்பநிலைக்கும் உள்ள தொடர்பு நன்கு விளக்கப்பெற்றது. முதுபழங்கொள்கையிலுள்ளது போலவே

ஐன்ஸ்டைனும் ஒரு திண்மப் பொருளின் ஒரு கிலோ மோலில் 'N' அணுக்கள் இருக்கிறதென்றும், அவற்றை $3N$ ஒற்றைப் பரிமாண சீரிசை அலையியற்றிகளாகக் கருதலாம் என்றும், அவை யாவும் பொதுவான ஒரே அதிர்வெண்ணோடு ஒன்றனுக்கொன்று பிணைப்பின்றி அலைவுறுமென்றும் எடுத்துக்கொண்டார். மேலும், அவர் கவளக் கொள்கையைப் பின்பற்றி அணு அலையியற்றிகளது ஆற்றல் $h\nu$ ன் முழுஎண் பெருக்கங்களாய் இருக்கின்றன என எடுத்துக்கொண்டார் (ஆனால், முதுபழங்கொள்கையில் இந்த அலையியற்றிகள் சுழியிலிருந்து, வரையிலி (∞) வரையான எந்த ஆற்றலோடும் இயங்க முடியும் என்று இருந்தது). அஃதாவது,

$$E_n = n\,h\,\nu \tag{5.11}$$

இதில் $n = 0, 1, 2, 3, ...$

இங்ஙனம் அனைத்து அணுஅலையியற்றிகளின் ஆற்றல்கள் கவளப்படுத்தப்பட்டுள்ளன. அலையியற்றியின் ஆற்றல் நிறமாலை (energy spectrum) தொடர்ச்சியில்லாமல் இருப்பதால் நாம் அலையியற்றியின் சராசரி ஆற்றல் மதிப்பினைக் கணக்கிடத் தொகையீடு முறைக்கு (integration method)ப் பதிலாய்க்கூட்டல் முறையினை (summation method)ப் பயன்படுத்த வேண்டும். அதனால் ஓர் ஒற்றைப் பரிமாண அணுஅலையியற்றியின் சராசரி ஆற்றல்,

$$\overline{E} = \frac{\sum_0^\infty E_n\,dN}{\sum_0^\infty dN} \tag{5.12}$$

இதில் dN என்பது ஆற்றல் E லிருந்து $E + dE$ வரை இடையே உள்ள ஆற்றல்களை உடைய அணு அலையியற்றிகளின் எண்ணிக்கை ஆகும். மேலும், அது $e^{-E_n/kT}$ க்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது.

E_n இன் மதிப்பைச் சமன்பாடு (5.12) இல் இட, $\overline{E} = \dfrac{\sum_0^\infty nh\nu\, e^{-nh\nu/kT}}{\sum_0^\infty e^{-nh\nu/kT}}$

இதில் $x = -h\nu/kT$ எனக்கொள்ள,

$$\overline{E} = h\nu \frac{\sum_0^\infty n\,e^{nx}}{\sum_0^\infty e^{nx}} = h\nu \frac{d}{dx}\left(\log_e \sum_0^\infty e^{nx}\right) \tag{5.13}$$

x இன் மதிப்பு ஒன்றைவிடக் குறைவாயிருக்கும் போது, ஸ்டெர்லிங் சூத்திரத்தின்படி $\sum_n x^n = \frac{1}{1-x}$ என நமக்குத் தெரியும். அதேபோல் $\sum_n e^{nx} = \frac{1}{1-e^x}$ என எழுதலாம்; அதனால், சமன்பாடு (5.13) ஐ பின்வருமாறு எழுதலாம்:

$$\overline{E} = h\,\nu \frac{d}{dx} \log_e \frac{1}{1-e^x} = h\,\nu \left[\frac{e^x}{1-e^x} \right]$$

பகுதியையும், தொகுதியையும் e^x ஆல் வகுக்க.

$$\overline{E} = \frac{h\,\nu}{e^{-x}-1}$$

x இன் மதிப்பினை இதில் இட,

$$\overline{E} = \frac{h\,\nu}{e^{h\,\nu/kT}-1} \tag{5.14}$$

ஒரு கிலோ மோலிலுள்ள 'N' அணுக்களின் மொத்த அதிர்வியக்க ஆற்றல்,

$$U = 3N\overline{E} = 3N \frac{h\,\nu}{e^{h\,\nu/kT}-1} \tag{5.15}$$

பருமன் மாறாத்தன்வெப்பஏற்புத்திறன் $C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V$

$$= 3N\,h\,\nu\,(-1) \left(e^{h\,\nu/kT} - 1 \right)^{-2} e^{h\,\nu/kT} \left(-\frac{h\,\nu}{kT^2} \right)$$

$$\therefore\; C_V = \frac{3N(h\,\nu)^2}{kT^2} \frac{e^{h\,\nu/kT}}{\left(e^{h\,\nu/kT} - 1 \right)^2}$$

$Nk = R$, பொதுவாயு மாறிலியாதலால்,

$$C_V = 3R \left(\frac{h\,\nu}{kT} \right)^2 \frac{e^{h\,\nu/kT}}{(e^{h\,\nu/kT}-1)^2} \tag{5.16}$$

$h\,\nu = k\,\theta_E$ என எடுத்துக்கொள்வோம். இதில் θ_E என்பது ஐன்ஸ்டைன் வெப்பநிலை. எனவே,

$$\frac{C_V}{3R} = \left(\frac{\theta_E}{T} \right)^2 \frac{e^{\theta_E/T}}{(e^{\theta_E/T}-1)^2}$$

இதில் $\frac{\theta_E}{T} = \frac{h\nu}{kT} = x$ என வை. பின்

$$\frac{C_V}{3R} = \frac{x^2 e^x}{(e^x - 1)^2} \tag{5.17}$$

சிறப்பு நேர்வுகள் (special cases) :

(i) ***மிக உயர்ந்த வெப்பநிலைகளில்*** :

மிக உயர்ந்த வெப்பநிலையின்போது $h\nu << kT$ (அல்லது) $\theta_E << T$ (அல்லது) $x \to 0$. இந்த நிபந்தனையின்படி x இன் மதிப்பு மிகச் சிறியதாய் இருக்கும். அதனால் e^x ஐ விரித்து எழுதி, அதில் முதல் மூன்று உறுப்புகளை மட்டும் எடுத்துக்கொண்டு மற்ற உறுப்புகளை விட்டுவிடலாம்.

$$\frac{C_V}{3R} = \frac{x^2 e^x}{(e^x - 1)^2} \approx \frac{x^2\left(1 + x + \frac{x^2}{2}\right)}{\left(1 + x + \frac{x^2}{2} - 1\right)^2} \approx \frac{x^2 + x^3 + \frac{x^4}{2}}{x^2 + x^3 + \frac{x^4}{4}}$$

மேற்கண்ட தொடர்பில் x^4 ஐக் கொண்ட உறுப்புகளின் மதிப்பு மிகமிகச் சிறியதாய் இருப்பதால் அவற்றை நீக்கிவிடலாம்.

$$\therefore \frac{C_V}{3R} \approx \frac{x^2 + x^3}{x^2 + x^3} \approx 1$$

$$\text{(அல்லது)} \quad C_V \approx 3R \tag{5.18}$$

அதனால், உயர்வெப்பநிலைகளில் C_V இன் நடைமுறை மதிப்பும், டியூலாங்-பெடிட் விதியிலிருந்துவரும் மதிப்பும், ஐன்ஸ்டைன் கொள்கையிலிருந்து வரும் மதிப்பும் சமமாயிருக்கின்றன.

(ii) ***மிகக் குறைந்த வெப்பநிலைகளில்*** :

மிகக் குறைந்த வெப்பநிலையின் போது $h\nu >> kT$ (அல்லது) $\theta_E >> T$ (அல்லது) $x \to \infty$. எனவே $e^x >> 1$ (அல்லது) $e^x - 1 \approx e^x$.

$$\therefore \frac{C_V}{3R} = \frac{x^2 e^x}{(e^x - 1)^2} \approx \frac{x^2 e^x}{e^{2x}}$$

$$\text{(அல்லது)} \quad \frac{C_V}{3R} \approx x^2 e^{-x} \tag{5.19}$$

$$\text{எனவே}\quad \frac{C_V}{3R} = (h\nu/kT)^2 e^{-h\nu/kT} = \frac{\left(\frac{h\nu}{kT}\right)^2}{1+\frac{h\nu}{kT}+\frac{1}{2}\left(\frac{h\nu}{kT}\right)^2+\frac{1}{6}\left(\frac{h\nu}{kT}\right)^3+\ldots}$$

மேற்கண்ட சமன்பாட்டிலிருந்து வெப்பநிலைக்கேற்ப C_V எவ்வாறு மாறுகிறது என்பதனை வரையறுப்பதில் $\left(\frac{h\nu}{kT}\right)^2$ எனும் உறுப்பினைவிட $e^{-h\nu/kT}$ எனும் உறுப்பிற்குச் சிறப்பிடம் உள்ளதென்பது தெளிவு. அதனால் வெப்பநிலை தாழ்ந்தால் C_V இன் மதிப்பு $e^{-h\nu/kT}$ எனும் வீதத்தில் குறையும்.

முடிவுகள் :

உயர்வெப்பநிலைகளில் ஐன்ஸ்டைனின் கொள்கைப்படி வந்த C_V இன் மதிப்பும், நடைமுறை ஆய்வுகளின்படி வந்த C_V இன் மதிப்பும் சமமாயுள்ளன. ஆனால், மிகக் குறைந்த வெப்பநிலைகளில் ஐன்ஸ்டைனின் கொள்கைப்படி C_V இன் மதிப்பு $e^{-h\nu/kT}$ க்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது. ஆனால், நடைமுறை ஆய்வுகளின்படி பார்க்கையில் C_V ஆனது பொருளின் வெப்பநிலையின் மும்மடிக்கு (T^3) நேர்விகிதத்தில் உள்ளது. படம் 5.1 இல் காட்டியுள்ளபடி, அஃதாவது, ஐன்ஸ்டைனின் கொள்கைப்படி, C_V இன் மதிப்பு மிகக் குறைந்த வெப்பநிலைகளில் ($T \rightarrow 0\,K$) மிக அதிக வீதத்தில் தாழ்ந்து சுழியை விரைவில் அடைகிறது. ஆனால், நடைமுறையில் அங்ஙனம் நடப்பதில்லை.

5.5 டிபையின் தன்வெப்பஏற்புத்திறன் கொள்கை (Debye's theory of specific heat)

ஐன்ஸ்டைனின் கொள்கையிலுள்ள குறைபாடுகளைக் களைய டிபை, ஐன்ஸ்டைனின் கொள்கையில் சில மாற்றங்களைப் புகுத்தி, ஆய்வுகளின் மூலம் அனைத்து வெப்பநிலைகளிலிருந்து வரும் C_V இன் மதிப்பும் தம் கொள்கையிலிருந்து வரும் C_V இன் மதிப்பும் ஒன்றாய் இருக்குமாறு ஒரு கொள்கையை வெளியிட்டார். அவர் கொள்கையின் சரத்துக்கள் பின்வருமாறு :

(அ) ஒருதிண்மத்திலுள்ள அணுக்கள் ஒன்றோடொன்று தொடர்பு கொண்டு சுருள் வில்களால் (springs) பிணைக்கப்பட்ட முப்பரிமாண அலையியற்றிகள் போல் உள்ளன. அவ்வாறு இருக்கும்போது அவையாவும் ஒரே அதிர்வெண்ணில் அலைவுறாமல் வேறுபட்ட பல அதிர்வெண்களில் அலைவுறும். அதன்படி எல்லா அலையியற்றிகளும் ஒரே அதிர்வெண்ணில் அதிராமல் அவற்றின் அதிர்வெண் நிறமாலையில் (frequency spectrum) உள்ள வெவ்வேறு அதிர்வெண்களில் அதிர்கின்றன.

(ஆ) அதிர்வெண் நிறமாலையில் அதிர்வெண்கள் தனித்தனியாயில்லாமல் சிறிது தொடர்ச்சியாய் (quasi continuous) இருப்பதாயும் அதிர்வெண் ν லிருந்து $\nu + d\nu$ வரையுள்ள அதிர்வு பாங்குகளின் (modes of vibration) மொத்த எண்ணிக்கையைத் தருவது

'**அதிர்வெண் அடர்த்திக் கோவை** (spectral density function), $Z(\nu)\, d\nu$' ஆகும். ஒவ்வோர் அணுவிற்கும் இருகுறுக்கு அதிர்வு பாங்குகளும், ஒரு நெடுக்கு அதிர்வு பாங்கும் இருக்கக் கூடும். அதனால் ν_t, ν_l என்பன முறையே குறுக்குப்பாங்கிலும், நெடுக்குப்பாங்கிலும் உள்ள திசை வேகங்களானால்,

$$Z(\nu)\, d\nu = 4\pi V \left(\frac{2}{\nu_t^3} + \frac{1}{\nu_l^3} \right) \nu^2\, d\nu \tag{5.20}$$

இதில் 'V' என்பது திண்மத்தின் பருமன் ஆகும்.

(இ) தாழ்வெப்பநிலைகளில் தன்வெப்பஏற்புத்திறனானது வெப்பநிலையையொட்டி மாறுவதனை விளக்கத் தொடர்பம் மாதிரியினைக் (continuum model) கையாள வேண்டும். தொடர்பம் மாதிரியில் அனைத்து அதிர்வெண்களும் இருக்கக்கூடும். ஆனால், 'N' அணுக்களுடைய ஒரு திண்மத்தில் $3N$ அதிர்வு பாங்குகளுக்கு மேல் இருக்க முடியாது. அதனால், அதிர்வெண்ணிற்கு ஓர் உயர்மதிப்பு இருக்க வேண்டும். அந்த உச்ச அதிர்வெண் அல்லது வெட்டு (cut-off) அதிர்வெண்ணை '**டிபை அதிர்வெண்** (Debye frequency)' என அழைக்கலாம். அதனை ν_D எனக்குறியிடுவதுண்டு. எனவே

$$\int_0^{\nu_D} Z(\nu)\, d\nu = 3N \tag{5.21}$$

இதில் $Z(\nu)$ இன் மதிப்பை இட,

$$\int_0^{\nu_D} 4\pi V \left(\frac{2}{\nu_t^3} + \frac{1}{\nu_l^3} \right) \nu^2\, d\nu = 3N$$

$$\therefore\ 4\pi V \left(\frac{2}{\nu_t^3} + \frac{1}{\nu_l^3} \right) \frac{\nu_D^3}{3} = 3N$$

$$\nu_D^3 = \frac{9N}{4\pi V} \left(\frac{2}{\nu_t^3} + \frac{1}{\nu_l^3} \right)^{-1} \tag{5.22}$$

அதனால், திண்மத்திலுள்ள அணுக்கள் ஒவ்வொன்றும் சுழியிலிருந்து ν_D வரை அமைந்த ஒவ்வோர் அதிர்வெண்ணில் அலைவுறும் எனக் கொள்ளலாம். கவளக்கொள்கைப்படி அணுஅலையியற்றியின் சராசரி ஆற்றல் $\overline{E} = h\nu / (e^{h\nu/kT} - 1)$ என ஐன்ஸ்டைன் கொள்கையிலே பார்த்தோம்.

அதனால் திண்மத்தின் அக ஆற்றல்,

$$U = \int_0^{\nu_D} \overline{E}\, Z(\nu)\, d\nu = \int_0^{\nu_D} \frac{h\nu}{(e^{h\nu/kT} - 1)} 4\pi V \left(\frac{2}{\nu_t^3} + \frac{1}{\nu_l^3} \right) \nu^2\, d\nu$$

$$= 4\pi V \left(\frac{2}{\nu_t^3} + \frac{1}{\nu_l^3} \right) \int_0^{\nu_D} \frac{h\nu^3\, d\nu}{(e^{h\nu/kT} - 1)}$$

சமன்பாடு (5.22) ஐப் பயன்படுத்தி மேலேயுள்ள சமன்பாட்டைச் சுருக்க

$$U = \frac{9N}{\nu_D^3} \int_0^{\nu_D} \frac{h\nu^3\, d\nu}{(e^{h\nu/kT} - 1)} \tag{5.23}$$

இதில் $x = \frac{h\nu}{kT}$, $x_{\text{பெருமம்}} = \frac{h\nu_D}{kT}$ மற்றும் $h\nu_D = k\,\theta_D$ எனஇட

$$U = \frac{9Nh}{\nu_D^3} \left(\frac{kT}{h} \right)^4 \int_0^{x_{\text{பெருமம்}}} \frac{x^3\, dx}{e^x - 1}$$

$$(\text{அல்லது}) \quad U = 9N \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3 kT \int_0^{\theta_D/T} \frac{x^3\, dx}{e^x - 1} \tag{5.23(a)}$$

$$\therefore\; C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V = 9Nk \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3 \int_0^{\theta_D/T} \frac{x^4 e^x\, dx}{(e^x - 1)^2} \tag{5.24}$$

சமன்பாடு (5.24) கிடைக்க, சமன்பாடு (5.23)ஐ வகையீடு செய்து, பின் $h\nu/kT = x$ என மதிப்பிடவும். மேலும் θ_D என்பது டிபை வெப்பநிலை (Debye temperature) ஆகும்.

நேர்வு 1:

உயர் வெப்பநிலைகளில், $T >> \theta_D$.

அதனால், $x << 1$. ஆகையால் $e^x \approx 1 + x$ என எடுத்துக் கொண்டு திண்மத்தின் அகஆற்றலைப் பின்வருமாறு எழுதலாம்.

$$U = 9NkT \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3 \int_0^{\theta_D/T} x^2 dx$$

$$= 9NkT \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3 \frac{1}{3} \left(\frac{\theta_D}{T} \right)^3$$

$$= 3NkT = 3\,RT$$

அதனால், பருமன்மாறாத் தன்வெப்பஏற்புத்திறன்,

$$C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V = 3R$$

அதனால், டிபை கொள்கைப்படி உயர்வெப்பநிலைகளில், $C_V/3R = 1$. இது நடைமுறை மதிப்பினையும், முதுபழங்கொள்கை மதிப்பினையும் ஒத்துள்ளது.

நேர்வு 2 :

தாழ்வெப்பநிலைகளில் $T << \theta_D$; அதனால் x இன் மதிப்பு மிக உயர்வாயிருக்கும். அஃதாவது, $x \to \infty$. இந்நிலைகளில் சமன்பாடு (5.23) கீழ்க்காணுமாறு மாறும்.

$$U = 9N \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3 kT \int_0^{\infty} \frac{x^3\, dx}{e^x - 1}$$

$$\int_0^{\infty} \frac{x^3\, dx}{e^x - 1} = \frac{\pi^4}{15} \text{ ஆனதால்}$$

$$U = 9N \frac{\pi^4}{15} kT \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3 = \frac{3}{5} \pi^4 N\, kT \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3 = \frac{3}{5} \pi^4 RT \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3$$

$$\text{இதனால்,} \quad C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V = \frac{3R}{5} \frac{\pi^4}{\theta_D^3} 4T^3$$

$$\text{(அல்லது)} \quad \frac{C_V}{3R} = \frac{4}{5} \pi^4 \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3 \tag{5.25}$$

$$\therefore C_V = AT^3 \tag{5.26}$$

இதில் $A = \dfrac{12\, R\, \pi^4}{5\, \theta_D^3}$. இஃது ஒரு மாறிலி. சமன்பாடு (5.26) **டிபையின் T^3 விதி** எனப்படும்.

அஃதாவது, மிகக் குறைந்த வெப்பநிலைகளில், பருமன்மாறாத்தன்வெப்ப ஏற்புத்திறன் C_V பொருளின் வெப்பநிலையின் மும்மடிக்கு நேர் விகிதத்தில் இருக்கும்; இது நடைமுறையோடு மிகவும் பொருந்தியிருக்கிறது.

முடிவுகள் :

டிபைக் கொள்கைப்படி பருமன்மாறாத் தன்வெப்பஏற்புத்திறனைப் பல வெப்பநிலைகளில் கணக்கிடும்போது நடைமுறை மதிப்புகளோடு மிகவும் பொருந்தியிருக்கிறது. அதனால் திண்மங்களில் அணுக்களின் அதிர்வுகள் பற்றிய

ஐன்ஸ்டைன் மாதிரியைவிட டிபை மாதிரி சிறப்பு மிக்கதாகவும், ஆய்வுகளின் மூலம் வரும் தன்வெப்பஏற்புத்திறன் மதிப்பும், டிபைக்கொள்கைமூலம் வரும் மதிப்பும் சமமாகவும் உள்ளன. குறிப்பாய்ப் பொருளின் வெப்பநிலை $T < 0.1\,\theta_D$ என இருக்கும்போது டிபையின் T^3 விதி நடைமுறையோடு நன்கு பொருந்துகிறது. எனவே டிபை மாதிரி ஒரு நல்ல மாதிரியாகும்.

டிபை மாதிரியில் பொருளின் அணிக்கோவையில் ஏற்படும் அதிர்வுகளின் அதிர்வெண்கள் அப்பொருளின் படிக இயலமைப்பினைச் சார்ந்திருப்பதை எடுத்துக் கொள்ளவில்லை. இதுவே டிபைமாதிரியில் உள்ள குறைபாடு ஆகும்.

5.6 *எலெக்ட்ரானிய தன்வெப்பஏற்புத்திறன்* (Electronic specific heat)

உலோக அணுக்களின் வெளிக்கூட்டில் (outermost shell) உள்ள இணைதிற எலெக்ட்ரான்களை (valency electrons)க் கடத்தும் எலெக்ட்ரான்களாய் (conduction electrons)க் கருதலாம். இவ்வித எலெக்ட்ரான்கள் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்கள்போல் செயல்படும். **ட்ரூடு-லாரென்ஸ் கொள்கைப்படி** (Drude-Lorentz theory) கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களை வாயு மூலக்கூறுகளுக்கு ஒப்பிடலாம். அதனால், மாக்ஸ்வெல்-போல்ட்ஸ்மேன் புள்ளியியலையும் (Maxwell-Boltzmann statistics), பாயிலின் விதி (Boyle's law) போன்ற வாயு விதிகளையும் பயன்படுத்தலாம். இது மிகப்பழைய கொள்கையாகும். இதன்படி முழுமை வாயு (ideal gas) வில் உள்ள ஒவ்வொரு மூலக்கூறுக்கும் சராசரி ஆற்றல் $\frac{3}{2}kT$ என இருப்பதுபோல் உலோகங்களிலுள்ள ஒவ்வொரு கட்டற்ற எலெக்ட்ரானுக்கும் சராசரி ஆற்றல் $\frac{3}{2}kT$ என இருக்கும். ஒவ்வொரு அணுவிலும் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை n எனவும், ஒரு கிலோ மோல் பொருளில் மொத்த அணுக்களின் எண்ணிக்கை N எனவும் கொண்டால் ஒரு கிலோ மோல் பொருளில் உள்ள கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களின் மொத்த ஆற்றல்,

$$W = \frac{3}{2}kTNn = \frac{3}{2}RTn$$

ஏனெனில், $R = Nk =$ பொது வாயு மாறிலி. எலெக்ட்ரானிய பருமன்மாறாத் தன்வெப்ப ஏற்புத்திறன்,

$$C_{V(\text{எலெக்ட்ரான்})} = \left(\frac{\partial W}{\partial T}\right)_V = \frac{3}{2}Rn$$

முன்பே உயர்வெப்பநிலைகளில் பருமன்மாறாத்தன்வெப்பஏற்புத்திறனில் அணிக்கோவை அதிர்வுகளின் பங்காக $3R$ எனக் கண்டோம். அதனால் ஓர் உலோகத்தின் மொத்தப் பருமன் மாறாத் தன்வெப்ப ஏற்புத்திறன்,

$$C_V = C_{V(\text{அணிக்கோவை})} + C_{V(\text{எலெக்ட்ரான்})}$$

$$C_V = 3R + \frac{3}{2}R\,n$$

$n = 1$ என மிகக் குறைந்த மதிப்பினை எடுத்துக் கொண்டாலும்

$$C_V = 3R + \frac{3}{2} R = 4.5\ R$$

அதனால், உலோகத்தின் மொத்தப் பருமன் மாறாத் தன்வெப்ப ஏற்புத் திறனின் மதிப்புக் குறைந்தது 4.5 R அல்லது 37.5 ஜூல் / மோல் / கெல்வின் என இருக்க வேண்டும். ஆனால், நடைமுறை ஆய்வுகளின்படி, கடத்தும் எலெக்ட்ரான்களே இல்லையென்று சொல்லக்கூடிய மின்கடத்தாப் பொருள்களுக்கு உள்ளது போன்றே உலோகங்களுக்கும் C_V- இன் மதிப்பு ஒரு கிலோ மோலுக்கு $3R$ ஆக இருக்கிறது. C_V- இன் மொத்த மதிப்பு $4.5R$ என்ற அளவுக்கு உயர்ந்து இருப்பதற்குச் சோதனை வாயிலாய்ச் சான்று ஏதுமில்லை. இவ்விதக் குறைபாடு வருவதற்குக் காரணம் மிகப்பழைய கொள்கையில் ஃபெர்மி-டிராக் புள்ளியியலை (Fermi–Dirac statistics)ப் பயன்படுத்தாமல் மாக்ஸ்வெல்-போல்ட்ஸ்மேன் புள்ளியியலைப் பயன்படுத்தியதே ஆகும்.

5.6.1 கவளக் கொள்கைப்படி எலெக்ட்ரானிய பருமன்மாறாத் தன்வெப்ப ஏற்புத்திறன்

கவளக் கொள்கையில் எலெக்ட்ரானிய தன்வெப்ப ஏற்புத்திறன் மதிப்பு நடைமுறை மதிப்போடு பொருந்துமாறு கிடைக்கிறது. அதன்படி பொருளை வெப்பப்படுத்தும்போது அநேக எலெக்ட்ரான்கள் அவற்றின் தொடக்க ஆற்றல் நிலைகளிலேயே இருக்கின்றன. ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டத்திற்கு மிக அருகில் உள்ள kT அகல ஆற்றல் பட்டையில் உள்ள ஆற்றல் மட்டங்களில் உள்ள எலெக்ட்ரான்களே வெப்ப ஆற்றலை உட்கவர்கின்றன. அதனால், அவற்றின் ஆற்றல் ஃபெர்மி ஆற்றலைவிட உயர்ந்து, கிளர்ச்சியுற்ற உயர் ஆற்றல் மட்டங்களை அடைகின்றன. இவ்வாறு எலெக்ட்ரானிய தன்வெப்ப ஏற்புத்திறன் கணக்கீட்டில் பங்கெடுக்கும் மொத்த எலெக்ட்ரான்கள் Nnக்குப்பதிலாக $\frac{NnkT}{E_f}$ ஆகும். இதில் 'N' என்பது ஒரு கிலோ மோலில் உள்ள மொத்த அணுக்களாகும். 'n' என்பது ஓர் அணுவிலுள்ள மொத்தக் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களாகும். உதாரணமாய்த் தாமிர அணுவை எடுத்துக்கொண்டால் $n = 1$. அதனால் தாமிரத்தில் மொத்த அணுக்களின் எண்ணிக்கை மொத்தக் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கைக்குச் சமம். இதில் $\frac{kT}{E_f}$ என்பது வெப்ப ஆற்றலை உட்கவரும் செயலுறு எலெக்ட்ரான்களின் பின்னத்தைக் குறிக்கிறது. ஓர் எலெக்ட்ரானின் சராசரி ஆற்றல் $\frac{3}{2} kT$ எனக் கொண்டால், எலெக்ட்ரான்களின் மூலம் உலோகத்திற்கு வரும் அக ஆற்றலின் மதிப்பு $\frac{NnkT}{E_f} \frac{3}{2} kT$ ஆகும்.

$$\therefore\ C_{V\,(\text{எலெக்ட்ரான்})} = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V = \frac{3nNk^2T}{E_f} = 3\ R\,\frac{kT}{E_f}\,n$$

எனவே 300 கெல்வினில் தாமிரத்தில், $kT = 0.025\ eV$ மற்றும் $E_f = 7\ eV$.

$$\therefore\ C_{V\,(\text{எலெக்ட்ரான்})} = 3\,R\left(\frac{0.025}{7}\right) = 0.0107\,R$$

அதனால் ஓர் உலோகத்தை வெப்பப்படுத்தும்போது மிகமிகக் குறைந்த ஆற்றலே எலெக்ட்ரான்களால் உட்கவரப்படுகிறது. ஆனால் அதிக அளவு வெப்ப ஆற்றல், **அணிக்கோவையில் உள்ள** அயனிகளால் உட்கவரப்படுகிறது. இதனாலேயே எலெக்ட்ரானியத் தன்வெப்ப ஏற்புத்திறன் மதிப்பு $\frac{3}{2}R$ ஐ விட மிகக் குறைவாயுள்ளது. அஃதாவது, எலெக்ட்ரானியத் தன்வெப்பஏற்புத்திறன் அணிக்கோவை தன்வெப்பஏற்புத் திறனின் ஒருவிழுக்காடு மதிப்பையே உடையதாயுள்ளது. அதனால், எலெக்ட்ரான்கள், திண்மப் பொருளின் மொத்தத் தன்வெப்பஏற்புத்திறன் மதிப்பிற்கு மிகமிகக் குறைந்த பங்கையே அளிக்கின்றன. எனினும் மிகமிகக் குறைந்த வெப்பநிலைகளில் அணிக்கோவை-தன்வெப்பஏற்புத்திறன் மதிப்புச் சுழிக்குப் போய்விடும். அந்நேரத்தில் எலெக்ட்ரானியத் தன்வெப்ப ஏற்புத்திறன் ஒன்றே திண்மப்பொருளின் தன்வெப்ப ஏற்புத்திறன் மதிப்பில் முழுப்பங்கு வகிக்கிறது. ஏனெனில் எலெக்ட்ரானியத் தன்வெப்பஏற்புத்திறன் மிகமிகக் குறைந்த வெப்பநிலைகளில் பொருளின் வெப்பநிலைக்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளதால், தாழ்வெப்பநிலைகளில் அதன் மதிப்பு மெதுவாகக் குறைகிறது. ஆனால், அதே தாழ்வெப்பநிலைகளில் அணிக்கோவை தன்வெப்பஏற்புத்திறன் பொருளின் வெப்பநிலையின் மும்மடிக்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளதால் மிகவிரைவில் குறைந்து சுழியாகிவிடும்.

மேலே கூறிய முடிவுகள்பற்றி இங்குச் சற்று விரிவாய்க் காண்போம்.

'E' என்னும் ஆற்றல் நிலையில் ஓர் எலெக்ட்ரான் இருப்பதற்குரிய நிகழ்தகவு p(E) எனவும் 'E', '$E + dE$' ஆகிய ஆற்றல்களுக்கிடையே இருக்கக்கூடிய ஆற்றல் நிலைகளின் அடர்த்தி (density of states) G(E) dE எனவும், எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை nN எனவும் கொண்டால்,

$$nN = \int_0^\infty 2\,p\,(E)\,G\,(E)\,dE \;\; = \int_0^\infty p(E)\,g\,(E)\,dE \tag{5.27}$$

இதில் 'N' என்பது ஒரு கிலோ மோலிலுள்ள மொத்த அணுக்கள் ; 'n' என்பது ஒவ்வோர் அணுவிலும் உள்ள கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை ஆகும். எலெக்ட்ரான்களால் வரும் அகஆற்றல் $W = n N\overline{E}$ (அல்லது)

$$W = \int_0^\infty \overline{E}\,p(E)\,g(E)\,dE \tag{5.28}$$

இதில் $$g(E)\,dE = \frac{4\pi}{h^3}\,(2m)^{3/2}\,E^{1/2}\,dE = CE^{1/2}\,dE \tag{4.17}$$

என்பதை முன்பே சென்ற அத்தியாயத்தில் பார்த்தோம். இங்கு C என்பது $\frac{4\pi}{h^3}(2m)^{3/2}$ ஆகும். மேலும்,

$$p(E) = \frac{1}{e^{(E-E_f)/kT}+1} \quad \text{(ஃபெர்மி-டிராக் பகிர்வுக் கோவை)}$$

$T = 0$ கெல்வின் எனில், $p(E) = 1 \quad E < E_f$

$$= 0 \quad E > E_f$$

இதில் E_f என்பது ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டம் ; k என்பது போல்ட்ஸ்மேன் மாறிலி.

பேதே-சாமர்பெல்டு மாதிரியை (Bethe–Sommerfeld model)ப் பின்பற்றிச் சமன்பாடு (5.28) இல் உள்ள தொகையத்தைத் தீர்ப்போம். அச்சமன்பாட்டைத் தீர்ப்பதற்கு முதலில் பின்வரும் தொகையத்தின் மதிப்பினைக் கண்டுபிடிப்போம்.

$$I = \int_0^\infty p(E)\frac{dF(E)}{dE}\,dE \tag{5.29}$$

இங்கு $F(E)$ என்ற கோவை, $E = 0$ என ஆகும்போது தானும் சுழியாய் மாறும் ஒருகோவையாகும். அஃதாவது, $E = 0$ எனில் $F(E) = 0$. சமன்பாடு (5.29) ஐ பகுதி முறையில் தொகையிட,

$$I = [p(E)\,F(E)]_0^\infty - \int_0^\infty F(E)\,p'(E)\,dE \tag{5.30}$$

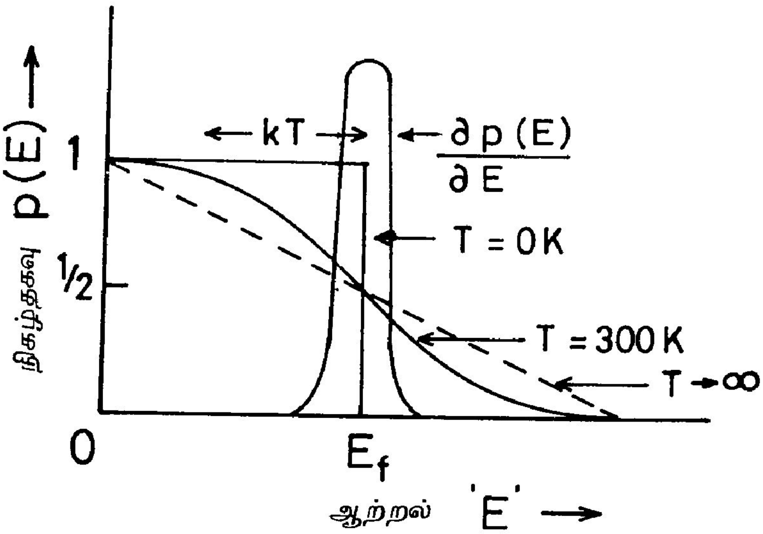
இதில் முதற்பகுதியான $[p(E)\,F(E)]_0^\infty$ என்பது சுழியாகிவிடும். ஏனெனில், மேல்வரம்பான வரையிலியை $(\infty)\,p(E)$ இல் இட, அது சுழியாகிவிடும். அஃதாவது, $p(\infty) = 0$. அதேபோல் கீழ்வரம்பான சுழியை $F(E)$ இல் இட, அது சுழியாகிவிடும். அஃதாவது, $F(0) = 0$. டெய்லர் தொடர் (Taylor's series) மூலம் E_f க்கு அருகில் $F(E)$ இன் மதிப்பினை விரித்து எழுத நமக்குக் கிடைப்பது,

$$F(E)_{E=E_f} = F(E_f) + (E-E_f)\,F'(E_f) + \frac{1}{2!}(E-E_f)^2\,F''(E_f) + \ldots.$$

அதனால்,

$$I = L_o\,F(E_f) + L_1\,F'(E_f) + L_2\,F''(E_f) + \ldots.. \tag{5.31}$$

இதில் $L_o = -\int_0^\infty p'(E)\,dE,\quad L_1 = -\int_0^\infty (E-E_f)\,p'(E)\,dE,\quad L_2 = -1/2\int_0^\infty (E-E_f)^2\,p'(E)\,dE$



படம் 5.2 பல்வேறு வெப்பநிலைகளில் ஃபெர்மி –டிராக்பகிர்வுக் கோவை, அதன் வகையீடு $\partial p(E)/\partial E$ ஆகியவற்றிற்குரிய வரைகள்.

மிகக் குறைந்த வெப்பநிலைகளில், அஃதாவது, $kT << E_f$ என இருக்கும் போது $p'(E)$ இன் மதிப்பு E_f க்கு அருகில் உள்ள ஆற்றல்களில் மட்டும் அதிகமாயிருக்கும். இக்கருத்து, படம் 5.2 இல் காண்பிக்கப்பட்டுள்ளது. அஃதாவது, படிக்கோவை (step function) ஒன்றை வகையீடு (differentiation) செய்தால் நமக்கு ஒரு டெல்டாக் கோவை (delta function) கிடைக்கும். இங்கும் $p(E)$ எனும் படிக்கோவையை வகையீடு செய்ய நமக்கு டெல்டாக் கோவை கிடைக்கும். அது E_f இல் பெரும மதிப்பினைப் பெற்றிருக்கும். மேலும், அதன் மதிப்பு மற்றைய ஆற்றல்களில் ஏறத்தாழச் சுழியாய் இருக்கும். இனி நாம் சமன்பாடு (5.31) இல் உள்ள தொகையங்களை ஒவ்வொன்றாய்த் தீர்ப்போம்.

$$L_o = -\int_0^\infty p'(E)\, dE$$

$$= -p(E)\Big|_0^\infty = 1. \quad \text{ஏனெனில் } p(\infty) = 0 \text{ மற்றும் } p(0) = 1.$$

இரண்டாம், மூன்றாம் தொகையங்களைத் தீர்க்கத் தொகையங்களில் $\frac{E - E_f}{kT} = \eta$ என இடவும். இதனைப் பயன்படுத்திப் பின்வருமாறு எழுதலாம்.

$$p'(E)\, dE = p'(\eta)\, d\eta$$

$$L_1 = -(kT)\int_{-E_f/kT}^{\infty} \eta\, p'(\eta)\, d\eta; \quad L_2 = \frac{-(kT)^2}{2}\int_{-E_f/kT}^{\infty} \eta^2 p'(\eta)\, d\eta$$

kT இன் மதிப்பு E_f ஐ விட மிகக்குறைவாக இருக்கும்போது, அஃதாவது $kT << E_f$, $E_f/kT \to \infty$. அதனால், மேற்கண்ட தொகையங்களிலுள்ள கீழ்வரம்புகளில் $-E_f/kT$ க்குப் பதிலாக $-\infty$ என இடலாம்.

$$\therefore\ L_1 = -(kT)\int_{-\infty}^{\infty} \eta\, p'(\eta)\, d\eta\ ;\quad L_2 = \frac{-(kT)^2}{2}\int_{-\infty}^{\infty} \eta^2\, p'(\eta)\, d\eta$$

இதில் L_1 இன் மதிப்புச் சுழியாகிவிடும். ஏனெனில், $p'(\eta)$ என்ற கோவை 'η'வின் இரட்டைப்படை (even function)க் கோவையாகும். அஃதாவது, $p'(\eta)$ வில் $\eta = \infty$ மற்றும் $\eta = -\infty$ என இட்டால் நமக்கு ஒரே மதிப்புதான் கிடைக்கும். அதன்ால், $\eta p'(\eta)$ ஒற்றைப்படையாகிவிடும். $\eta p'(\eta) = f(\eta)$ என வை.

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(\eta)\, d\eta \quad \text{வில்}\ f(\eta)\ \text{ஓர் ஒற்றைப்படைக் கோவை.}$$

அதனால், தொகையீட்டுப் பண்புகளின்படி

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(\eta)\, d\eta = 0 = \int_{-\infty}^{\infty} \eta\, p'(\eta)\, d\eta \tag{5.32}$$

இப்போது L_2 ஐ எடுத்துக்கொள்வோம் ; அதில் $\eta = -t$ என இட,

$$L_2 = \frac{-(kT)^2}{2}\int_{\infty}^{-\infty} \frac{t^2 e^{-t}}{(1+e^{-t})^2}\, dt = \frac{(kT)^2}{2}\int_{-\infty}^{\infty} \frac{t^2 e^{-t}}{(1+e^{-t})^2}\, dt$$

$$= (kT)^2 \int_0^{\infty} t^2 \left(e^{-t} - 2\, e^{-2t} + 3\, e^{-3t} - \ldots\right) dt$$

இலாப்லாஸ் மாற்றை (Laplace's transform)ப் பயன்படுத்தி இதனைத் தீர்க்கலாம்.

வரையறை :

$$L\,(f(t)) = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t)\, dt \quad \text{எனில்,}$$

$f(t) = t^n$ என இருக்கும்போது,

$$L\,(f(t)) = \frac{n!}{s^{n+1}}$$

அதனால்,

$$L_2 = (kT)^2 \,.\, 2\left[1 - \frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} - \frac{1}{4^2} + \ldots\right] = (kT)^2 \,.\, 2 \,.\, \frac{\pi^2}{12} = (kT)^2 \frac{\pi^2}{6}$$

அதனால், சமன்பாடு (5.31)- ன் மதிப்பு

$$I = F(E_f) + \frac{(kT)^2}{6}\pi^2 F''(E_f) + \ldots. \qquad (5.33)$$

$$F(E) = \int_0^E E\, g(E)\, dE \text{ என எடுத்துக்கொண்டால்}$$

$$\frac{\partial F(E)}{\partial E} = E\, g(E)\, ; \frac{\partial^2 F(E)}{\partial E^2} = \frac{\partial}{\partial E}(E\, g(E)) \qquad (5.34)$$

இத்தகைய நிபந்தனைகளில் தொகையம் 'I' யின் மதிப்பு எலெக்ட்ரான்களால் வரும் மொத்த அக ஆற்றலுக்குச் சமமாகும். அஃதாவது, $I = W$.

$$\therefore\ W = \int_0^\infty Ep(E)\, g(E)\, dE = \int_0^{E_f} Eg(E)\, dE + \frac{\pi^2}{6}(kT)^2\left[\frac{\partial\,(Eg(E))}{\partial E}\right]_{E_f}$$

$$= \int_0^{E_{fo}} Eg(E)\, dE + \int_{E_{fo}}^{E_f} Eg(E)\, dE + \frac{\pi^2}{6}(kT)^2\left[\frac{\partial\,(Eg(E))}{\partial E}\right]_{E_f}$$

இங்கு E_{fo} என்பது சுழிகெல்வின் வெப்பநிலையில் ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டமாகும். g(E) இன் மதிப்பினை இட்டுப்பின் வகையிட,

$$W = \int_0^{E_{fo}} Eg(E)\, dE + \int_{E_{fo}}^{E_f} Eg(E)\, dE + \frac{\pi^2}{6}(kT)^2 \frac{3}{2} CE_f^{1/2} \qquad (5.35)$$

இதில்

$$C = \frac{4\pi}{h^3}(2m)^{3/2}$$

மேலும், $E_{fo} \approx E_f$

$$\therefore\ W \approx W_o + \left(E_f - E_{fo}\right) E_{fo}\, g(E_{fo}) + \frac{\pi^2}{4}(kT)^2 C\, E_f^{1/2} \qquad (5.36)$$

இதில் சமன்பாடு (5.35) இன் இரண்டாம் தொகையத்தின் தோராய மதிப்பு எழுதப்பட்டுள்ளது. அதனால், அகஆற்றல் கணக்கீட்டில் பிழை ஏதும் ஏற்படாது. மேலும் W_o என்பது சுழிகெல்வின் வெப்பநிலையில் எலெக்ட்ரான்களின் மொத்த ஆற்றலைக் குறிக்கும். இப்போது E_f, E_{fo} ஆகியவற்றிற்கு இடையே உள்ள தொடர்பினைக் கண்டுபிடிப்போம். ஒரு கிலோ மோலிலுள்ள கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களின் மொத்த எண்ணிக்கை,

$$nN = \int_0^{\infty} g(E)\, p(E)\, dE$$

மேற்கண்ட தொகையத்தைத் தீர்க்க

$$F(E) = \int_0^{E} g(E)\, dE$$

என எடுத்துக்கொண்டால் சமன்பாடு (5.29), nN இன் மதிப்பினைக் கொடுக்கும், அஃதாவது,

$$nN = F(E_f) + \frac{\pi^2}{6}(kT)^2 F''(E_f)$$

மேலும் nNஐ பின்வருமாறும் கணக்கிடலாம். அஃதாவது,

$$nN = \int_0^{E_{fo}} g(E)\, dE$$

$$\therefore \int_0^{E_{fo}} g(E)\, dE = F(E_f) + \frac{\pi^2}{6}(kT)^2 F''(E_f)$$

இதில் $F(E_f) = \int_0^{E_f} g(E)\, dE$

மற்றும் $F''(E_f) = g'(E_f)$

$$\therefore \int_0^{E_{fo}} g(E)\, dE = \int_0^{E_f} g(E)\, dE + \frac{\pi^2}{6}(kT)^2 g'(E_f)$$

(அல்லது) $$g(E_f)\left(E_f - E_{fo}\right) + \frac{\pi^2}{6}(kT)^2 g'(E_f) = 0$$

$g(E_f), g'(E_f)$ இன் மதிப்புகளை மேலேயுள்ள சமன்பாட்டில் இட,

$$(E_f - E_{fo})\,\frac{4\pi}{h^3}\,(2m)^{3/2}\,E_f^{1/2} = \frac{-\pi^2}{6}\,(kT)^2\,\frac{4\pi}{h^3}\,m^{3/2}\,2^{1/2}\,E_f^{-1/2}$$

$$(E_f - E_{fo})\,E_f = \frac{-\pi^2}{12}\,(kT)^2$$

எனினும், $E_f \approx E_{fo}$.

$$\therefore\; E_f = E_{fo}\left[1 - \frac{\pi^2}{12}\,\frac{(kT)^2}{E_{fo}^2}\right] \qquad (5.37)$$

அதனால், வெப்பநிலை உயர ஃபெர்மி ஆற்றலும் மிகச் சிறிய அளவில் குறைகிறது. ஆகையால், $g(E_{fo}) \approx g(E_f)$ என வைத்துக்கொண்டு 'C', E_f ஆகியவற்றின் மதிப்புகளைச் சமன்பாடு (5.36) இல் இட,

$$W = W_o + \frac{\pi^2}{6}\,(kT)^2\,\frac{1}{2\pi^2}\left(\frac{2m}{\hbar^2}\right)^{3/2}\,E_f^{1/2} \qquad (5.38)$$

nN என்பது மொத்த எலெக்ட்ரான்கள் எனக் கொண்டால்,

$$nN = \int_0^{E_{fo}} g(E)\,dE = \int_0^{E_{fo}} CE^{1/2}\,dE = \frac{2}{3}\,C\,E_{fo}^{3/2}$$

$$\frac{3}{2}\,nN\,E_{fo}^{-3/2} = C = \frac{1}{2\pi^2}\left(\frac{2m}{\hbar^2}\right)^{3/2} \qquad (5.39)$$

சமன்பாடு (5.39) ஐ பயன்படுத்தி, (5.38) ஐ பின்வருமாறு எழுதலாம்.

$$W = W_o + \frac{\pi^2}{4}\,(kT)^2\,nN\,E_f^{1/2}\,E_{fo}^{-3/2}$$

மேலும், $E_f \approx E_{fo}$

$$\therefore\; W = W_o + \frac{\pi^2}{4}\,(kT)^2\,nN\,E_{fo}^{-1}$$

$E_{fo} = kT_f$ என எடுத்துக்கொண்டால் நமக்குக் கிடைப்பது

$$W = W_o + \frac{\pi^2}{4}\,(kT)^2\,\frac{nN}{kT_f} \qquad (5.40)$$

இதில் T_f என்பது ஃபெர்மி வெப்பநிலை ஆகும்.

$$\therefore\; C_{V\,(\text{எலெக்ட்ரான்})} = \left(\frac{\partial W}{\partial T}\right)_V = \frac{\pi^2}{4}\,k^2\,2T\,\frac{nN}{kT_f}$$

$$(\text{அல்லது})\ C_{V\,(\text{எலெக்ட்ரான்})} = \frac{\pi^2}{2} nN \frac{kT}{T_f} = \frac{\pi^2}{2} nR \frac{T}{T_f} \qquad (5.41)$$

அதனால், $C_{V\,(\text{எலெக்ட்ரான்})} \alpha\, T$.

சமன்பாடு (5.41)ன்படி சோடியத்தில் $C_{V(\text{எலெக்ட்ரான்})}$ இன் மதிப்பினைக் கண்டுபிடிப்போம். சோடியத்தில் சுழிகெல்வின் வெப்பநிலையில் ஃபெர்மி ஆற்றல் $E_{fo} = 3.23$ எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு; அதனால் $T_f = 37{,}450$ கெல்வின். மேலும், அதில் $n = 1$. ஆகையால், சோடியத்தில் 300 கெல்வினில் எலெக்ட்ரானிய பருமன்மாறாத் தன்வெப்பஏற்புத்திறன்,

$$C_{V(\text{எலெக்ட்ரான்})} = \frac{\pi^2 \times R \times 1 \times 300}{2 \times 37450} = 0.0395R$$

வெள்ளிக்கு எடுத்துக்கொண்டால், $E_{fo} = 5.48$ எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு. எனவே $T_f = 63536$ கெல்வின்; மேலும் $n = 1$. ஆகையால் அறைவெப்பநிலையான 300 கெல்வினில்

$$C_{V(\text{எலெக்ட்ரான்})} = 0.023R.$$

மேற்கண்ட மதிப்புகள் நடைமுறை மதிப்புகளோடு நன்கு பொருந்துகின்றன. அதனால், சாதாரண வெப்பநிலைகளில் தன்வெப்பஏற்புத்திறனின் மதிப்பில் எலெக்ட்ரானின் பங்கினை அணிக்கோவை அதிர்வின் பங்கோடு ஒப்புநோக்க முன்னது புறக்கணிக்கத்தக்க அளவு சிறிதாயுள்ளது. எனவே, சாதாரண வெப்பநிலைகளில் தன்வெப்ப ஏற்புத்திறனின் மதிப்பை அணிக்கோவை அதிர்வுகளே தீர்மானிக்கின்றன.

ஆனால், தாழ்வெப்பநிலைகளில் அணிக்கோவை அதிர்வின் பங்கு T^3- க்கு நேர்விகிதத்தில் இருப்பதால் விரைந்து குறைகிறது. அதே சமயம் எலெக்ட்ரானின் பங்கு T− க்கு நேர்விகிதத்தில் இருப்பதால் மெதுவாகக் குறைகிறது. அதனால் மிகத் தாழ் வெப்பநிலைகளில் தன்வெப்ப ஏற்புத்திறனின் மதிப்பைக் கணக்கிடும் போது, அணிக்கோவை அதிர்வின் பங்கினைக் காட்டிலும், எலெக்ட்ரானின் பங்கு உயர்ந்து காணப்படுகிறது.

5.7 வெப்ப விரிவு (thermal expansion)

எல்லாத் திண்மப் பொருள்களையும் வெப்பப்படுத்தும்போது அவை விரிவடைகின்றன. ஆனால், வாயு, திரவப்பொருள்களோடு ஒப்பிடும்போது திண்மப் பொருள்களின் வெப்ப விரிவு மிகமிகக் குறைவானதாகும். திண்மப் பொருள்களுக்கு மூவகை விரிவுகள் உண்டு. நீள்விரிவு, பரப்பு விரிவு, பருமவிரிவு என்பன அம் மூவகை விரிவுகள் ஆகும். ஒரு மீட்டர் நீளமுள்ள பொருளின் வெப்பநிலையை ஒரு கெல்வின் உயர்த்தும்போது அதன் நீளத்தில் ஏற்படும் மிகுதிப்பாடு அப் பொருளின் நீள்விரிவெண் 'α' எனப்படும். இதனைப் பின்வருமாறும் எழுதலாம்.

$$\alpha = \frac{1}{l}\left(\frac{dl}{dT}\right) = \frac{l_2 - l_1}{l_1\left(T_2 - T_1\right)} \qquad (5.42)$$

இங்கு l_1, l_2 முறையே T_1, T_2 கெல்வின் வெப்பநிலைகளில் இருந்த பொருளின் நீளங்களாகும்.

பரப்பு விரிவு எண் 'β', பரும விரிவு எண் 'γ' ஆகியவற்றை நீள்விரிவெண்மூலம் எழுதலாம்.

$\beta = 2\,\alpha\,;\gamma = 3\,\alpha$ (திசைசாராப் பண்பியல் (isotropic) உள்ள திண்மப் பொருள்களில்)

$\gamma = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$ (திசைசார் பண்பியல் (anisotropic) உள்ள திண்மப் பொருள்களில் (படிகங்கள்))

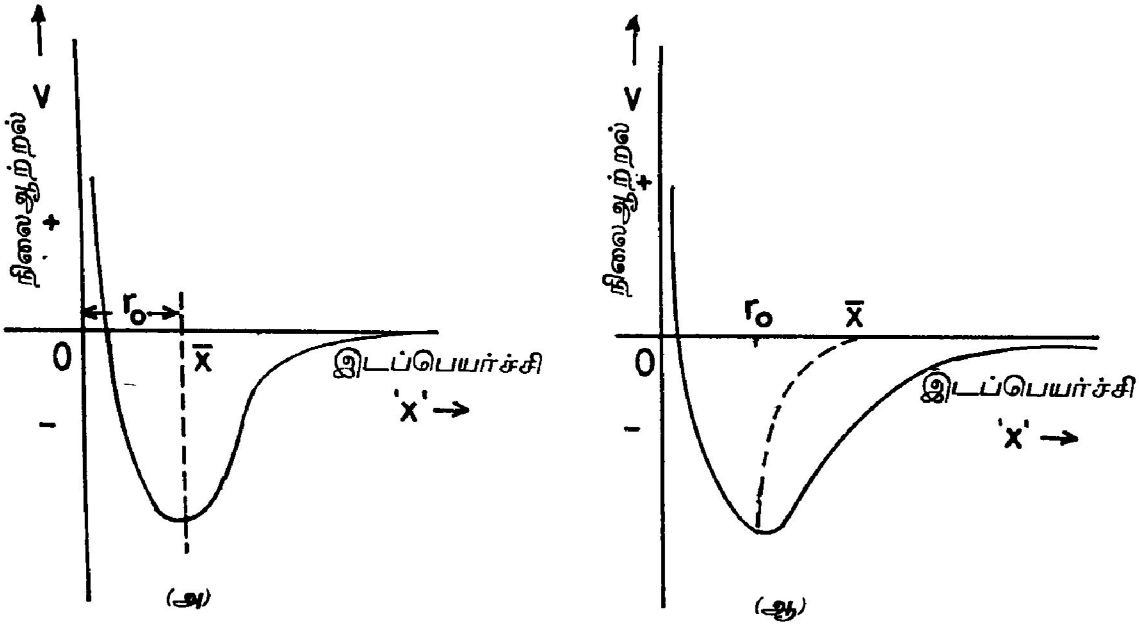
இதிலிருந்து நீள்விரி எண்ணின் மதிப்பு வெப்பம் உட்செல்லும் படிகத்தின் முகப்பு நிலை (orientation) யைச் சார்ந்துள்ளது என்பதனை அறிய முடியும்.

5.7.1 **வெப்பவிரிவின் தோற்றம்** (origin of thermal expansion)

திண்மப் பொருள்களில் உள்ள அணு அலையியற்றியின் நிலை ஆற்றல் (potential energy) அதன் இருப்பிடத்திற்கு ஏற்பச் சமச்சீர்க்கோவையாயில்லாதபோது அது சீரிசை அலையியற்றியாய்ச் செயல்படாது. ஆனால், நாம் தன்வெப்பஏற்புத்திறன் கணக்கிடும்போது அதிரும் அணுக்களைச் சீரிசை அலையியற்றிகளாய் எடுத்துக் கொண்டுள்ளோம். அங்ஙனம் எடுத்துக்கொள்ளும்போது அணுவின் நிலைஆற்றல் கோவை பரவளைய (parabola) அமைப்பினைப் பெறும். ஆனால், பொருளினுள் வெப்பம் அதிகரிக்கும்போது அலையியற்றிகளின் அதிர்வின் வீச்சு அதிகரிக்கும். திண்மப் பொருளின் உருகுநிலையின்போது உள்ள அணு இடைத்தூரத்தின் 12 விழுக்காடுகள் வரை அதிர்வின் பெருமவீச்சு இருக்கமுடியும். அதிர்வின் வீச்சு மேலும் அதிகரித்தால், பரவளைய அமைப்பில் சமச்சீர் இல்லாப் பகுதிகள் தோன்றத் தொடங்குகின்றன. அதனால், சீரிசை அதிர்வுகளில் சிறிது மாற்றம் ஏற்பட்டுச் சிறிது சீரிசையற்ற அதிர்வுகளாய் (anharmonic vibrations) ஆகின்றன. அதனால், பொருள்கள் விரிவடையும்போது அதிர்வுகளின் வீச்சு அதிகமாவதுடன் அணு இடைத்தூரமும் கூடுகிறது. மேற்கண்ட இருவிளைவுகளும் சீரிசையற்ற அதிர்வுகளால் உண்டாகின்றன. அதனால், பொருளின்கண் ஏற்படும் சீரிசையற்ற அதிர்வுகளே வெப்பவிரிவுக்குக் காரணமாகும். மேலும் சீரிசையற்ற அதிர்வுகளுடன் பொருளின் வெப்பங் கடத்தலும் இணைந்துள்ளது. ஒரு திண்மத்தின் நிலையாற்றல் வரை மிகுதியாய்ச் சமச்சீரற்றதாயிருந்தால் நீள்விரிவெண்ணும் அதிகமாயிருக்கும். இக்கருத்தைப் படம் 5.3 விளக்குகிறது.

நீள்விரிவெண் α – க்கான ஒருதொடர்பினைப் பின்வருமாறு கண்டுபிடிக்கலாம். முதலில் அலையியற்றியின் சராசரி இடப்பெயர்ச்சித் தூரமாய $\bar{x}$ ன் மதிப்பினைக் கணக்கிடுவோம். ஓர் அணு அலையியற்றியின் நிலைஆற்றல் கோவையைப் பின்வருமாறு எழுதலாம்.

$$U(x) = \underbrace{ax^2}_{\text{சீரிசைப் பகுதி}} \quad \underbrace{-\,gx^3 - fx^4}_{\text{சீரிசையற்ற பகுதி}} \tag{5.43}$$



படம் 5.3 வெப்பவிரிவு விளக்கப் படம்

(அ) ஒரு சீரிசை அலையியற்றியின் நிலைஆற்றலுக்கும், இடப்பெயர்ச்சிக்கும் இடையே வரையப்பட்ட வரை. சராசரி இடப்பெயர்ச்சி $\bar{x}$ – ம், சமநிலை அணுஇடைத்தூரம் r_0 – ம் ஒரே புள்ளியில் அமைந்திருப்பதை நோக்குக.

(ஆ) ஒரு சீரிசையற்ற அலையியற்றியின் நிலைஆற்றலுக்கும், இடப்பெயர்ச்சிக்கும் இடையே வரையப்பட்ட வரை. சராசரி இடப்பெயர்ச்சி $\bar{x}$, சமநிலை அணுஇடைத்தூரம் r_0 இல் இருந்து நேர்க்குறியுடைய x திசையில் நகர்ந்துள்ளதைத் தொடர்ச்சியில்லாமல் வரையப்பட்ட கோடு காண்பிக்கிறது. அஃதாவது, பொருளில் விரிவு ஏற்பட்டுள்ளது.

இக்கோவையிலுள்ள இடப்பெயர்ச்சி 'x', அணிக்கோவை மாறிலியின் உயர்வு அல்லது வெப்பவிரிவினைக் காட்டும். நீள்விரிவெண் 'α' வை வேறு ஒருகணியம் 'α'' மூலம் விளக்கலாம். மீச்சிறு வெப்பநிலை மாற்றத்தை '∂T' எனவும், அதனால் ஏற்படும் மீச்சிறு வெப்பவிரிவு அல்லது இடப்பெயர்ச்சி மாற்றத்தை '$\partial \bar{x}$' எனவும் கொண்டால்

$$\alpha' = \frac{\partial \bar{x}}{\partial T}$$

என எழுதலாம். α' –ம். α –வும் நேர் விகிதத்தில் உள்ளவையாகும்.

சமன்பாடு (5.43)இல் x^3–ஐ உடைய உறுப்பு, நிலைஆற்றல் வரையின் இடப்பக்கத்தைக் கூர்மையாயும், வலப்பக்கத்தைப் பட்டையாயும் மாற்றுகிறது. அதே சமன்பாட்டில் உள்ள x^4 –ஐ உடைய உறுப்பு நிலைஆற்றல்வரையின் அடிப்பாகத்தைப் பட்டையாக்குகிறது. மேலும், இடப்பெயர்ச்சி ஏற்படத் தேவையான ஆற்றலைக் குறைப்பதன்மூலம் அது மிகுந்த வீச்சு அதிர்வுகளைச்சீராக்குகிறது.

போல்ட்ஸ்மேன் பகிர்வுக் கோவையின் (Boltzmann distribution function) மூலம், சராசரி இடப்பெயர்ச்சியைக் கண்டுபிடிக்கலாம்:

$$\bar{x} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x \exp\left[-(ax^2 - gx^3 - fx^4)/kT\right] dx}{\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-(ax^2 - gx^3 - fx^4)/kT\right] dx} \tag{5.44}$$

சீரிசையற்ற பகுதிகளான gx^3, fx^4 ஆகியவை ax^2 இன் மதிப்பினைவிட மிகக்குறைந்த மதிப்புகளையுடையவை. அதனால்,

$$\exp\left[\frac{-(ax^2 - gx^3 - fx^4)}{kT}\right] = \exp\left[\frac{-ax^2}{kT}\right] \exp\left(\frac{gx^3 + fx^4}{kT}\right) \approx \exp\left[\frac{-ax^2}{kT}\right]\left[1 + \frac{gx^3 + fx^4}{kT}\right]$$

$$\therefore \bar{x} \approx \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[\frac{-ax^2}{kT}\right]\left(x + \frac{gx^4}{kT} + \frac{fx^5}{kT}\right) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{ax^2}{kT}\right) dx}$$

$$\bar{x} = \frac{0 + \frac{3}{4}\frac{g}{kT}\sqrt{\frac{\pi k^5 T^5}{a^5}} + 0}{\sqrt{\frac{\pi kT}{a}}}$$

$$(\text{அல்லது}) \quad \bar{x} = \frac{3}{4}\frac{g}{a^2} kT \tag{5.45}$$

$$\therefore \alpha' = \frac{\partial \bar{x}}{\partial T} = \frac{3}{4}\frac{gk}{a^2} \tag{5.46}$$

மேற்கண்ட கணக்கீடுகளின் மூலம் வெப்பவிரிவு பொருளின் கெல்வின் வெப்பநிலைக்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது எனவும், அதேசமயம் நீள்விரிவெண் பொருளின் வெப்பநிலையைச் சார்ந்ததில்லை எனவும் அறியலாம். இத்தகைய முடிவுகள் அறை வெப்பநிலைக்கும், அதற்கு மேலுள்ள வெப்பநிலைக்கும் பொருந்தும். மிகக் குறைவான வெப்பநிலைகளில் நீள்விரிஎண், நாம் கணக்கிட்ட மதிப்பினைவிட மிகமிகக் குறைவாயுள்ளது. அஃதாவது, $T \to 0\,K$ எனில் $\alpha \to 0$. இந்தத் தீர்வைப் பழங்கொள்கையில் பயன்படும் மாக்ஸ்வெல்-போல்ட்ஸ்மேன் பகிர்வின் மூலம் தருவிக்க முடியாது. அதனால், நாம் மேற்கண்ட சமன்பாடுகளில் கவளக் கொள்கையைப் புகுத்த வேண்டும். அஃதாவது, அணுஅலையியற்றியின் ஆற்றலான 'kT' க்குப் பதிலாய் ஐன்ஸ்டைனின் தன்வெப்ப

ஏற்புத்திறன் கொள்கையில் கண்டுபிடிக்கப்பட்ட அணு அலையியற்றி ஆற்றலைச் சமன்பாடு (5.44)இல் இட,

$$\overline{x} = \frac{3g}{4a^2} \frac{h\nu}{(e^{h\nu/kT} - 1)} \tag{5.47}$$

இதன்படி, உயர் வெப்பநிலைகளில் நமக்குச் சமன்பாடு (5.44)இல் உள்ள மதிப்புக் கிடைக்கும். ஆனால் $T \to 0\,K$ என ஆகும்போது $(e^{h\nu/kT} - 1) \approx e^{h\nu/kT}$. எனவே சமன்பாடு (5.47) பின்வருமாறு மாறும்.

$$\overline{x} = \frac{3g}{4a^2} h\nu \exp\left(-h\nu/kT\right)$$

$$\alpha' = \frac{\partial \overline{x}}{\partial T} = \frac{3gk}{4a^2}\left(\frac{h\nu}{k}\right)^2 \exp\left(-h\nu/kT\right)\frac{1}{T^2}$$

மேற்கண்ட சமன்பாட்டில் வெப்பநிலை $T \to 0\,K$ என மாறும் போது, $\exp(-h\nu/kT) \to 0$ என்றாகும். அதனால், $\alpha \to 0$. குறிப்பாய் வெப்பநிலை மிகவும் குறையும்போது நீள்விரிஎண்ணின் மதிப்பு மிகமிகக் குறைகிறது என்றும், சுழிகெல்வின் வெப்பநிலையில் 'நீள்விரி எண்' சுழியாய் மாறும் என்றும் முடிவுக்கு வரலாம். எனவே கவளக் கொள்கையின்படி வந்த சமன்பாடு (5.47) அனைத்து வெப்பநிலைகளிலும், நடைமுறை மதிப்புகளோடு பொருந்தும் இடப்பெயர்ச்சியையும், நீள்விரிஎண்ணையும் தருவதாயுள்ளது.

குருனீசென் (Gruneisen) என்பவர் திண்மங்கள் பற்றிய டிபை மாதிரியை (Debye model of solids)ப்பின்பற்றி நீள்விரி எண்ணுக்காகப் பின்வரும் ஒருகோவையைத் தருவித்துள்ளார். அதன்படி,

$$\alpha = \frac{G\, C_V\, \beta}{3V} \tag{5.48}$$

இதில் 'G' என்பது குருனீசென் மாறிலி. அதன் மதிப்பு வெவ்வேறு உலோகங்களுக்கு 1.6 லிருந்து 3 வரை மாறுகிறது. மேலும், அது வெப்பநிலையைச் சார்ந்ததில்லை. 'V' என்பது மோலார் பருமன் (molar volume); 'C_V' என்பது பருமன்மாறா மோலார் தன்வெப்பஏற்புத்திறன்(molar specific heat). மேலும் 'β' என்பது பொருளின் அழுந்துந் தன்மை (compressibility) ஆகும். மேற்கண்ட சமன்பாடு அநேக திண்மப் பொருள்களுக்குக் குறிப்பாய்த் தாழ்வெப்பநிலைகளில் நன்கு பொருந்துவதாய்ச் சோதனைகள் மூலம் நிரூபிக்கப்பட்டுள்ளது.

சில பொருள்கள் வெப்பத்தினால் எந்த அளவு விரிவடைகின்றன என்று பார்ப்போம். சக பிணைப்பினை (covalent bonded) உடைய பொருள்களில் ஈர்ப்பு விசை அதிகமாயிருப்பதால், அது வெப்பவிரிவினை மிகவும் சிறியதாய் மாற்றி விடுகிறது. அதனால், சக பிணைப்பு உடைய பொருள்களில் வெப்பவிரிவு மிகக்குறைவேயாகும்.

ஆனால், உலோகப் பிணைப்பு (metallic bond) உடைய உலோகங்களில் மிகுதியாய் வெப்ப விரிவு தோன்றுகிறது. ஏனெனில் உலோகப் பிணைப்பு, சக பிணைப்பைவிட குறைவான பிணைப்பு ஆற்றல் உடையது. அதனால், ஈர்ப்புவிசை மிகுதியாய் இராது. சில கூட்டுத்தொகுதிப் பொருட்களாய (complex materials) இலாஸ்டோமர்கள் எனப்படும் மீட்சிமடிகளில் (elastomers) வெப்பவிரிவு மிகமிக அதிகம். ஏனெனில், அவை இரண்டாம் தரப் பிணைப்புகளால் (secondary bonds) ஆனவை. மேலும், அவற்றின் மூலக்கூறுகளுக்கு இடையே உள்ள குறுக்கு இணைப்புகள் (cross linkages) மிகவும் ஆற்றல் குறைந்ததாய் உள்ளன. வெப்ப நெகிழிபன்மடிகளில் (thermoplastic polymers), குறிப்பாய் லுசைட்டில் (lucite) நீள்விரிஎண் 'α' மிகக் குறைவாக இருக்கும். ஏனென்றால், அவற்றின் மூலக்கூறுகளுக்கு இடையே உள்ள குறுக்கு இணைப்புகள் மிக்க ஆற்றல் வாய்ந்தவை. பேக்லைட் (bakelite) போன்ற வெப்பஉறை நெகிழிகளில் (thermosetting plastics) நீள்விரிஎண் மதிப்பு வெப்ப நெகிழியைவிட மிகமிகக் குறைவு. இவற்றில் சகபிணைப்பு வகையைச் சேர்ந்த குறுக்கு இணைப்புகள் உள்ளன. இன்வார் (invar) என்னும் உலோகக் கலவையில், நீள்விரிஎண் மதிப்பு ஏறத்தாழச் சுழியாயுள்ளது. இதற்குக் காரணம் காந்தப் பெயர்வு ஆகும். இன்வாரில் 64 விழுக்காடுகள் இரும்பும், 36 விழுக்காடுகள் நிக்கலும் உள்ளன. வெப்பநிலை உயரும்போது ஏற்படும் வெப்பவிரிவும் இரும்பியல் பொருள்களில் ஏற்படும் காந்தப் பரிமாண மாற்றத்தால் வரும் சுருக்கமும் சேர்ந்து இன்வாருக்கு நீள்விரிஎண்ணைச் சுழியாய் மாற்றிவிடுகின்றன. இஃது இன்வாரின் கியூரி வெப்பநிலையான 473 கெல்வின்வரை உண்மையாயிருக்கும். அக்கியூரி வெப்பநிலைக்குமேல் வெப்பநிலை கூடினால் இன்வார் சாதாரண உலோகங்கள்போல், தானும் விரிவடையும்.

5.8 போனான்கள் (Phonons)

போனான்கள் என்பது மின்காந்த அலைகளின் ஆற்றல்களைத் தம்மிடையே கொண்டுள்ள போட்டான்களைப்போல் மீள் அலைகளின் (elastic waves) ஆற்றல்களைத் தம்மிடையே கொண்டுள்ளன. ஒரு கவள மீள்ஆற்றல் அல்லது ஒலி ஆற்றலைத் தாங்கியுள்ள ஒரு துகளுக்குப் 'போனான்' என்று பெயர். ஒருபோனானின் ஆற்றல் '$h\nu$' அலகு ஆகும். இதில் 'h' என்பது பிளாங்க் மாறிலி ; ν என்பது மீள்அலைகளின் அதிர்வெண் ஆகும். போட்டான்களுக்குத் துகள் பண்பும், அலைப் பண்பும் இருப்பதுபோல் இதற்கும் துகள் பண்பும், அலைப் பண்பும் உள்ளது. அணிக்கோவை அதிர்வுகளில் ஒரு குறிப்பிட்ட வகையில் தோன்றும் ஆற்றலைப் போனான் ஆற்றல்களில் குறிப்பிடுவர். போனான்கள் வெப்ப ஆற்றல் மூலம் தோற்றுவிக்கப்படுகின்றன. ஏனெனில், வெப்ப ஆற்றல் மீள்அலைகளைத் தோற்றுவிக்கிறது. அதனால், பொருளின் வெப்பநிலை உயரும்போது போனான்களின் எண்ணிக்கை உயருகிறது. இந்தப் போனான்கள் கடத்திகள், குறை கடத்திகள் ஆகியவற்றிலுள்ள அணிக்கோவைகளுடே நகர்ந்துவரும் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களையும், துளைகளையும் சிதறடிக்கக் கூடியவை. அதனால், இப்போனான்கள் மின்னூட்டக்கடத்திகளின் இயக்கத்தை மாற்றுகின்றன. போனான்கள் ஒருபடிகத்தில் இருந்தால் அஃது ஒரு முழுமையுறாப் படிகமாகும். போனான்கள் வெப்பங் கடத்தலுக்கு மிகவும் துணைபுரிகின்றன. உலோகங்களில் போனான்கள் மிகுதியாகும் போது அவற்றின் மின்கடத்துந்திறன் குறைகிறது. இதேபோல் மீக்கடத்திகளில் (superconductors)

போனான்கள் பொதுவாயிராது; ஆனால், போனான் அடர்த்தி சிறிது சிறிதாய்க் கூடினால் அது சாதாரண கடத்திபோல் மாறிவிடும். அதனால் பொருள்களின் மின்கடத்துந்திறனை அதிகரிக்கவேண்டும் என்று நினைக்கும்போது போனான்கள் விரும்பத்தகாத துகள்கள்போல் ஆகிவிடுகின்றன. ஆனால், வெப்பங்கடத்துந்திறனை அதிகரிக்க வேண்டும் என்று நினைக்கும்போது போனான்கள் விரும்பத் தகுந்த துகள்கள்போல் மாறிவிடும். அதனால் போனான் கருத்தியல்மூலம் பொருள்களில் எலெக்ட்ரானும் போனானும் எங்ஙனம் இடைவினை புரிகின்றன என்பதனையும், வெப்பங் கடத்தல், மின் கடத்தல் போன்றவை எந்த அளவு நடைபெறுகின்றன என்பதனையும் அறிந்துகொள்ளலாம்.

5.9 வெப்பங் கடத்தல் (thermal conduction)

ஒரு பொருளின் வெப்பங்கடத்துந்திறன் என்பது அதன் ஒருமுனைவழிச் செல்லும் வெப்பம் யாவும் மறுமுனை வழியாய் வெளியேறும் நிலையில், அவற்றிற்கிடையே ஓரலகு வெப்பநிலை வாட்டத்தில் (temperature gradient) ஓரலகு குறுக்குப் பரப்பின் வழியே, ஒரு செகண்டில் பரவும் வெப்பமாகும். இதனைப்பின்வருமாறு எழுதலாம்.

$$Q = -K\frac{dT}{dx}$$

(அல்லது) $K = -\dfrac{Q}{dT/dx}$ வாட்டுமீ$^{-1}$கெ$^{-1}$ (அல்லது) ஜூல் செ$^{-1}$ மீ$^{-1}$ கெ$^{-1}$ (5.49)

இதில் K என்பது பொருளின் வெப்பங்கடத்துந்திறன்; $\dfrac{dT}{dx}$ என்பது வெப்பவாட்டம் ; Q என்பது வெப்பப்பாயம் (heat flux) ஆகும். அதனைப்பின்வருமாறு வரையறுக்கலாம்.

$Q = H/A$. இதில் H என்பது ஓரலகு நேரத்தில் (ஒருசெகண்டில்) பொருளினுள் செலுத்தப்பட்ட வெப்ப அளவு ஆகும். 'A' என்பது பொருளின் குறுக்குப் பரப்பு. அதனால் வெப்பப்பாயம் என்பது ஓரலகு குறுக்குப் பரப்பின்வழியே ஒரு செகண்டில் பரவும் வெப்ப அளவு ஆகும். மேற்கண்ட சமன்பாட்டின்மூலம் வெப்பப்பாயம், வெப்ப வாட்டத்திற்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது என்று அறியலாம். மேலும் சமன்பாட்டிலுள்ள எதிர்க்குறி, வெப்பம் உயர் வெப்பநிலையிலிருந்து தாழ் வெப்பநிலைக்குப் பரவுகிறது என்பதைக் காட்டுகிறது.

திண்மப் பொருள்களில் வெப்பங்கடத்தல் முறையில் எலெக்ட்ரான்கள், போனான்கள் மூலம் வெப்பம் பரவுகிறது. அதனால், திண்மப் பொருட்களில் மொத்த வெப்பங் கடத்துந்திறனை எலெக்ட்ரான்களால் வரும் வெப்பங்கடத்துந்திறனையும், போனான்களால் வரும் வெப்பங்கடத்துந்திறனையும் கூட்டுவதால் வரும் தொகையாய் எழுதலாம். அஃதாவது,

$$K_{(\text{மொத்தம்})} = K_{(\text{எலெக்ட்ரான்})} + K_{(\text{போனான்})} \quad (5.50)$$

உலோகங்களில் வெப்பங்கடத்துந்திறனில் எலெக்ட்ரானின் பங்கு ஓங்கி இருக்கும். மின்கடத்தாப் பொருள்களில் எலெக்ட்ரானின் பங்கே இல்லாமல், போனான்களின் பங்கு நிறைந்து இருக்கும். பொதுவாய் எலெக்ட்ரானால் வரும் வெப்பங் கடத்துந்திறன் மதிப்பு, போனானால் வருதலைவிட மிக அதிகமாயிருப்பதால் உலோகங்களில் வெப்பங் கடத்துந்திறன் அதிகமாயும், மின்கடத்தாப் பொருள்களில் வெப்பங்கடத்துந்திறன் குறைவாயும் உள்ளது, அயனிப்பிணைப்பு, சக பிணைப்பு உடைய திண்மப் பொருள்களில் போனான்கள் மூலமாகவே வெப்பம் பரவுகிறது. அவற்றுக்கு வெப்பங்கடத்துந்திறன் மிகக் குறைவு. அதேபோல் பன்மடிகளில் (polymers) மூலக்கூறு சுழற்சி, மூலக்கூறு அதிர்வு, மூலக்கூறு பெயர்வு ஆகியவற்றின் மூலம் வெப்பம் பரவுகிறது. அதனால், இவற்றின் வெப்பங் கடத்துந்திறன் மிகமிகக் குறைவு. சுத்தமான உலோகங்களுக்கு,

$$K_{(\text{மொத்தம்})} \approx K_{(\text{எலெக்ட்ரான்})}$$

என எழுதலாம். ஏனெனில், $K_{(\text{எலெக்ட்ரான்})} >> K_{(\text{போனான்})}$. குறிப்பாய் உலோகங்களில்,

$$K_{(\text{எலெக்ட்ரான்})} = 100\, K_{(\text{போனான்})}$$

ஒரு பொருளின் மொத்த வெப்பங் கடத்துந்திறனைப் பின்வருமாறு எழுதலாம்.

$$K = \frac{1}{3} C_V \bar{v} \lambda \qquad (5.51)$$

இதில் C_V என்பது பொருளின் பருமன் மாறாத் தன்வெப்பஏற்புத் திறன்; $\bar{v}$ என்பது சராசரி வெப்பத் திசைவேகம் (mean thermal velocity); λ என்பது சராசரி மோதலிடைத்தூரம் (mean freepath) ஆகும். எலெக்ட்ரானிய தன்வெப்பஏற்புத்திறன் மதிப்பு, போனானின் தன்வெப்பஏற்புத்திறனைக்காட்டிலும் மிகக் குறைவாயிருந்திடினும் எலெக்ட்ரானின் சராசரி வெப்பத்திசைவேகமும், அதன் சராசரி மோதலிடைத்தூரமும் போனான்களுக்கு இருப்பதைவிட 100 மடங்கு கூடுதலாயிருப்பதால் எலெக்ட்ரானின் வெப்பங் கடத்துந்திறன் போனானின் வெப்பங்கடத்துந் திறனைவிட அதிகமாயுள்ளது.

சுத்தமான, முழுமையான சில அலோக (non-metal)க் கடத்திகளில்,

$$K_{(\text{எலெக்ட்ரான்})} = K_{(\text{போனான்})}$$

என்று உள்ளது. இவற்றில் போனானின் மோதலிடைத்தூரம் மிக அதிக அளவில் உள்ளது. அதனால், அறை வெப்பநிலையிலிருந்து 30 கெல்வின்வரை வைரம் வெள்ளியைவிட நல்லதொரு வெப்பங்கடத்தியாய்ச் செயல்படுகிறது.

பொதுவாய் உலோகங்களில் வேற்றுப் பொருள் கலந்திருந்தாலும் அல்லது உலோகக் கலவையை உருவாக்கும்போதும் வெப்பங்கடத்துந்திறன் குறைகிறது. உதாரணமாய், ஆஸ்டனைட் நிலையிலுள்ள துருப்பிடிக்காத எஃகு (austenitic stainless steel) நடைமுறையில் ஒரு வெப்பங்கடத்தாப் பொருளாகவே, அநேக வெப்பநிலைகளில் செயல்படுகிறது. இதிலுள்ள வேற்றுப் பொருள்கள் எலெக்ட்ரான்கள், போனான்கள்

ஆகியவற்றின் மோதலிடைத்தூரங்களைக் குறைத்துவிடுகின்றன. மேலும் மிகக் குறைந்த வெப்பநிலைகளில் வெப்பங்கடத்துந்திறன் ஏறத்தாழ ஒரு மாறிலியாகவே உள்ளது. நுண்துளை (porous) மலிந்த பொருள்களே நல்ல வெப்பங்கடத்தாப் பொருள்களாய் விளங்குகின்றன. உதாரணமாக குளிர்படுத்தும் கருவிகளில் (cryogenic devices) உள்ள நுண்துளை மலிந்த பன்மடிப் பொருள்களை எடுத்துக்கொள்ளலாம். இப்பொருள்கள் மூலம் வெப்பங்கடத்தலில் வெற்றிடத்திற்கு ஒப்பான செயல்திறனைப் பெறலாம். வெற்றிடம் வெப்பங்கடத்தாது என்பது அனைவரும் அறிந்ததே. படிகங்களில் வெப்பங் கடத்துந்திறன் படிகத் திசைகளைச் சார்ந்துள்ளது. அதனால் படிகங்களில் வெப்பங்கடத்துந்திறன் திசைசார்ப் பண்பியலைப் பெறுகிறது. மேலும், படிக நிலையிலுள்ள மின்கடத்தாப் பொருள்களான வைரம் (diamond), குவார்ட்ஸ் (quartz), நீலக்கல் (sapphire) ஆகியவற்றில் வெப்பநிலை, சுழிகெல்வின் வெப்பநிலையிலிருந்து உயரும்போது அவற்றின் வெப்பங்கடத்துந்திறன் உயர்கிறது. ஆனால், மேற்கண்ட பொருள்கள் ஒவ்வொன்றிற்கும் ஒருமாறுநிலை வெப்பநிலை (transition temperature) உள்ளது. அந்த வெப்பநிலை வந்தவுடன் வெப்பநிலை உயர்ந்தாலும்கூட பொருளின் வெப்பங் கடத்துந்திறன் குறைகிறது. அஃதாவது, நீலக்கல்லை எடுத்துக்கொண்டால் சுழிகெல்வின் வெப்பநிலையிலிருந்து 40 கெல்வின்வரை வெப்பங் கடத்துந்திறன் கூடிக்கொண்டே போய்ப் பின் 40 கெல்வினிலிருந்து வெப்பங் கடத்துந்திறன் குறையத் தொடங்குகிறது. இத்தகுபண்பை உலோகமான தாமிரத்திலும் காணலாம். மேலும் வைரத்திற்கு 120 கெல்வின்வரை வெப்பங் கடத்துந்திறன் வெப்பநிலை உயர தானும் உயருகிறது. ஆனால், 120 கெல்வினுக்குப்பின் வெப்பநிலை உயர்ந்தாலும் கூட வெப்பங் கடத்துந்திறன் சிறிது சிறிதாய்க் குறைந்துகொண்டே வரும். குவார்ட்சுக்கு மாறுநிலை வெப்பநிலை 20 கெல்வினுக்கும் கீழே இருப்பதால் பெரும்பாலும் வெப்பநிலை உயர்வின் போது அதன் வெப்பங்கடத்துந்திறன் குறைந்துகொண்டே வருகிறது. சென்ற பகுதியில் கூறியது போல் பொருளின் வெப்பங்கடத்துந்திறன், பொருளின்கண் ஏற்படும் சீரிசையற்ற அதிர்வுகளைச் சார்ந்துள்ளது.

5.10 எலெக்ட்ரானிய வெப்பங்கடத்துந்திறனைக் கணக்கிடல்

(அ) முதுபழங்கொள்கையின்படி

எலெக்ட்ரானிய வெப்பங்கடத்துந்திறனை முதுபழங்கொள்கை மூலம் கணக்கிடலாம். இதன்படி திண்மப் பொருள்களில் உள்ள கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களனைத்தும் ஒரு வாயுவிலுள்ள மூலக்கூறுகளுக்குச் சமம். வாயுக்களின் இயக்கக்கொள்கை (kinetic theory of gases) யின்படி மூலக்கூறுகளிடையே இடைவினை (interaction) ஏதும் இல்லையென்பதும், மூலக்கூறு ஒவ்வொன்றும் மோதல்களில் ஆற்றலை இழக்காத ஒரு கோளத்திண்மப் பொருள் என்பதும் யாவரும் அறிந்தனவே. முதுபழங்கொள்கையின்படி வாயுக்களின் இயக்கக் கொள்கையைக் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களுக்கும் பயன்படுத்தலாம். நேர்குறியுடைய 'x' திசையில் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களின் பாயம் (flux) $\frac{1}{2} n_o \overline{v}_x$ ஆக இருக்கும். இதில் n_o என்பது ஒரு கிலோகிராம் அணுவில் உள்ள மொத்த கட்டற்ற

எலெக்ட்ரான்களாகும். வெப்பச் சமநிலையில் இதே அளவுள்ள பாயம் எதிர்க்குறியுடைய 'x' திசையிலும் இருக்கும். அதனால் 'x' திசையில் செல்லும் மொத்த கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களின் பாயம்

$$= \frac{1}{2} n_o \overline{v}_x - \left(- \frac{1}{2} n_o \overline{v}_x \right) = n_o \overline{v}_x$$

இதில் $\overline{v}_x$ என்பது 'x' திசையில் எலெக்ட்ரானின் சராசரி வெப்பத் திசைவேகத்தின் கூறு (velocity component) ஆகும். 'C' என்பது எலெக்ட்ரானின் தன்வெப்பஏற்புத்திறன் எனக் கொண்டால் பின் ஒருகிலோகிராம் அணுவின் எலெக்ட்ரானிய தன்வெப்பஏற்புத்திறன்

$$C_{V\,(\text{எலெக்ட்ரான்})} = n_o C$$

ஓர் எலெக்ட்ரான், வெப்பநிலை $(T + \Delta T)$ உள்ள ஒருபகுதியிலிருந்து வெப்பநிலை 'T' உள்ள பகுதிக்கு வரும்போது அப்பகுதிக்கு வெப்பஆற்றல் $C \Delta T$ யைக் கொடுத்துவிடும். மேற்கண்ட இருபகுதிகளுக்கும் இடையே உள்ளதூரத்தின் மதிப்பு ஒரு மோதலிடைத்தூரம் 'λ' எனக்கொள்வோம். 'τ' என்பது சராசரி மோதலிடை நேரமாயிருக்கும் போது

$$\lambda = \overline{v}_x \tau$$

எனவே ΔTயைப் பின்வருமாறு எழுதலாம்.

$$\Delta T = \frac{dT}{dx} \lambda = \frac{dT}{dx} \overline{v}_x \tau$$

மொத்த வெப்ப ஆற்றல் பாயம் $Q = n_o \overline{v}_x C \Delta T$

$$= n_o \overline{v}_x^2 \frac{dT}{dx} C \tau$$

வாயுக்களின் இயக்கக் கொள்கையின்படி ஓர் எலெக்ட்ரானின் மீதுள்ள அழுத்தம் எல்லாத் திசைகளிலும் சமமாயிருக்கும்.

$$\therefore \overline{v}_x^2 = \overline{v}_y^2 = \overline{v}_z^2$$

ஆனால், $\overline{v}^2 = \overline{v}_x^2 + \overline{v}_y^2 + \overline{v}_z^2$

இதில் $\overline{v}$ என்பது எலெக்ட்ரானின் சராசரி வெப்பத்திசைவேகமாகும்.

$$\therefore \overline{v}_x^2 = \frac{1}{3} \overline{v}^2$$

அதனால், $Q = \frac{1}{3} n_o \overline{v}^2 C \tau \frac{dT}{dx}$

$$\text{இதில் } \bar{v}\tau = \lambda. \text{ மற்றும் } Cn_o = C_{V\,(\text{எலெக்ட்ரான்})}$$

$$\therefore Q = \frac{1}{3} C_{V\,(\text{எலெக்ட்ரான்})}\, \bar{v}\, \lambda \frac{dT}{dx} \tag{5.52}$$

$$= K_{(\text{எலெக்ட்ரான்})} \frac{dT}{dx}.$$

இங்கு $$K_{(\text{எலெக்ட்ரான்})} = \frac{1}{3} C_V \bar{v} \lambda \tag{5.53}$$

மேலும் $K_{(\text{எலெக்ட்ரான்})}$ என்பது எலெக்ட்ரானிய வெப்பங் கடத்துந்திறன் ஆகும்.

முதுபழங்கொள்கைப்படி, $C_{V(\text{எலெக்ட்ரான்})} = \frac{3}{2} R$

அதனால், $$K_{(\text{எலெக்ட்ரான்})} = \frac{1}{2} R \bar{v} \lambda \tag{5.54}$$

(ஆ) **கவளக்கொள்கையின்படி** :

கவளக்கொள்கைப்படி $$C_{V(\text{எலெக்ட்ரான்})} = \frac{\pi^2}{2} R\, n \frac{T}{T_f} \tag{5.41}$$

இதில் 'n' என்பது ஓர் அணுவிலுள்ள கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை. 'T_f' என்பது ஃபெர்மி வெப்பநிலை. மேலும், வெப்பங்கடத்தலில் ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டத்திற்கு அருகில் உள்ள எலெக்ட்ரான்கள் மட்டும் பங்கெடுப்பதால் நாம் சராசரி எலெக்ட்ரான் திசைவேகமான $\bar{v}$ க்குப் பதிலாய் ஃபெர்மி திசைவேகமான v_f ஐ எடுத்துக்கொள்ள வேண்டும். மேலும், இதில் சராசரி மோதலிடைத்தூரம் பின்வருமாறு கணக்கிடப்படுகிறது.

அஃதாவது, $\lambda_f = v_f \tau_f$

இதில் 'τ_f' ஃபெர்மி மட்ட எலெக்ட்ரான்களின் தளர்நேரம் (relaxation time) அல்லது மோதலிடைநேரம் ஆகும். அதனால் $C_{V\,(\text{எலெக்ட்ரான்})}$, v_f ஆகியவற்றை வெப்பங்கடத்துந் திறனுக்கான சமன்பாடு (5.53) இல் இட,

$$K = \frac{1}{3} C_{V\,(\text{எலெக்ட்ரான்})}\, v_f \lambda_f$$

$$= \frac{1}{3} \frac{\pi^2}{2} Rn \frac{T}{T_f} v_f^2 \tau_f$$

$$K = \frac{\pi^2}{6} Rn \frac{T}{T_f} v_f^2 \tau_f \tag{5.55}$$

$$\text{இங்கே} \quad E_f \approx E_{f_0} = kT_f = \frac{1}{2} m v_f^2$$

$$\text{எனவே} \quad K = \frac{\pi^2}{6} Rn \frac{T}{T_f} \frac{2kT_f}{m} \tau_f$$

$$= \frac{\pi^2}{3} \frac{Rnk}{m} \tau_f T \qquad (5.56)$$

மேற்கண்ட சமன்பாட்டிலிருந்து வெப்பங் கடத்துந்திறன் ஆனது வெப்பநிலைக்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது போல் தோன்றினாலும் அது உண்மையன்று. ஏனெனில், தளர்நேரம் வெப்பநிலையைச் சார்ந்துள்ளது. டிபை வெப்பநிலைக்கு மேற்பட்ட வெப்பநிலைகளில் தளர்நேரம் ஆனது வெப்பநிலைக்கு எதிர்விகிதத்திலிருக்கும். அதனால், இந்த வெப்பநிலை நெடுக்கத்தில் வெப்பங்கடத்துந்திறனானது வெப்பநிலையைச் சார்ந்ததன்று. ஆனால், தாழ்வெப்பநிலைகளில் வெப்பங் கடத்துந்திறனானது வெப்பநிலையைச் சார்ந்துள்ளது. அஃதாவது, தாழ்வெப்பநிலைகளில் ஏறத்தாழ வெப்பங்கடத்துந்திறன் வெப்பநிலைக்கு நேர்விகிதத்திலிருக்கும்.

5.11 ***அணிக்கோவை அதிர்வுகளால் வெப்பங்கடத்தல்*** (thermal conduction due to lattice vibrations)

மின் கடத்தாப் பொருள்களில் வெப்பங்கடத்தல் பெரும்பாலும் அணிக்கோவை அதிர்வுகளால் நடைபெறுகின்றன என்று முன்னரே பார்த்தோம். உலோகங்களில் இதன் பங்கு எலெக்ட்ரானிய கடத்தலோடு ஒப்பு நோக்க மிகக் குறைவாயிருக்கும்

1914 ஆம் ஆண்டு டிபை, வெப்பங்கடத்தலில் அணிக்கோவை அதிர்வுகளின் பங்கிற்கான ஒரு கொள்கையை உருவாக்கினார். அதன்படி அணுக்களிடையேயுள்ள விசைகள் தூய சீரிசை விசைகளாயிருக்குமானால் அணிக்கோவை அலைகளிடையே எவ்விதமான பிணைப்பும் இருக்க முடியாது. சீரிசை அலைகளைப் பொருத்தவரை அலைகளிடையே சிதறல் நிகழ முடியாது. ஆனால், திண்மங்கள் வெப்பத்தால் விரிவடைவதால் இவ்வலைகள் சீரற்று இருக்கும். அணிக்கோவை அதிர்வுகள் போனான் அலைகளாகப் பரவுவதால், தூய சீரிசைப் போனான் அலைகளின் சராசரி மோதலிடைத்தூரம் λ_p ஆனது வரையிலியாகத்தான் இருக்க வேண்டும். ஆனால் சீரற்ற அணிக்கோவை அதிர்வுகளுக்கு λ_p ஒரு குறிப்பிட்ட மதிப்பினைப் பெற்றிருக்கும். அதனால், வெப்பங்கடத்துந்திறனில் அணிக்கோவை அதிர்வின் பங்கையும் சமன்பாடு (5.53) போலவே பின்வருமாறு எழுதலாம்.

$$K_{(\text{அணிக்கோவை})} = K_{(\text{போனான்})} = \frac{1}{3} C_{V(\text{அணிக்கோவை})} \; v \, \lambda_p.$$

இங்கே C_V (அணிக்கோவை) என்பது அணிக்கோவைத் தன்வெப்பஏற்புத்திறன் ஆகும். 'v' என்பது போனான் அலைகளின் திசைவேகம். இஃது ஒலி அலைகள் ஓர் ஊடகத்தே செல்லும்போது உள்ள அவற்றின் திசைவேகமாகும்.

1914 இல் டிபையும், 1929 இல் பையர்ல்சும் (Peierls) உயர்வெப்பநிலைகளில் λ_p ஆனது வெப்பநிலைக்கு எதிர்விகிதத்திலிருக்கும் என்று காட்டினார்கள். இதனைப் பின்வரும் கருத்துகளின் மூலம் புரிந்து கொள்ளலாம். கவளக் கொள்கையின்படி ν_k என்ற அதிர்வெண்ணில் உள்ள மொத்த போனான்களின் எண்ணிக்கை

$$n_k = \frac{1}{\left(\exp\left(\frac{h\,\nu_k}{kT}\right) - 1\right)}$$

உயர்வெப்பநிலைகளில் $(h\,\nu_k/kT) << 1$

அதனால், $n_k \approx \frac{kT}{h\nu_k}$ அல்லது $n_k \,\alpha\, T$

அதனால், போனான்களின் எண்ணிக்கை வெப்பநிலைக்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது. அதேசமயம் போனான்களின் மோதலிடைத்தூரம் λ_p, போனான்களின் எண்ணிக்கைக்கு எதிர்விகிதத்திலிருக்கும். அஃதாவது,

$$\lambda_p \,\alpha\, \frac{1}{T}$$

அதனால் உயர்வெப்பநிலைகளில், $K_{(\text{அணிக்கோவை})} \,\alpha\, \frac{1}{T}$

தாழ்வெப்பநிலைகளில் λ_p ஆனது படிகத்தின் பரிமாணங்களால் வரையறுக்கப்படுகிறது. பெரும்பாலும் அது வெப்பநிலையைச் சார்ந்ததன்று. எனினும் $C_{V(\text{அணிக்கோவை})} \,\alpha\, T^3$. எனவே தாழ்வெப்பநிலைகளில்

$$K_{(\text{அணிக்கோவை})} \,\alpha T^3$$

$T \to 0\,K$ என்றாகும்போது $\lambda_p \to \infty$; ஆனால் $C_{V(\text{அணிக்கோவை})} \to 0$. அதனால் $K_{(\text{அணிக்கோவை})} \to 0$.

எனவே வெப்பநிலை சுழிகெல்வினிலிருந்து உயரும் போது அணிக்கோவை வெப்பங்கடத்துந்திறனும் உயர்ந்து, பெரும நிலை அடைகிறது. வெப்பநிலை மேலும் உயர்ந்து கொண்டே போனால், வெப்பங் கடத்துந்திறன் குறைந்து கொண்டே வரும்.

5.12 பொருள்களின் வெப்பத் தடையும், வெப்ப அதிர்ச்சித் தடையும் (thermal resistance and thermal shock resistance of materials)

ஒரு பொருளின் இரு எதிர் முனைகளில் வெப்பநிலை வேறுபாடு உள்ள போது அதனுள் வெப்பம் செலுத்தினால் அவ்வெப்பத்தைத் தாங்கும் ஆற்றலை நிர்ணயிப்பது பொருளின் வெப்பத்தடை (thermal resistance) ஆகும். பொருளின் கண் மிக விரைவான வெப்பநிலை வேறுபாடுகள் தோற்றுவிக்கும் போது அதன் இயற்பியல் பண்புகளில் பழுதுகள் ஏதும் நிகழாதவாறு அப்பொருளைக் காக்கும் கணியத்திற்கு வெப்ப அதிர்ச்சித்தடை (thermal shock resistance) என்பர். இக்கணியத்தின் அளவு மிகுதியாக ஒரு பொருளில் இருந்தால், திடீரென்று பொருளின் வெப்பநிலை மாறுபடும்போது அதன்

வடிவமைப்பில் சீர்குலைவோ அல்லது வெடிப்புக்களோ ஏற்படாமல் இருக்கும். எனவே இவ்வகைப்பண்பு உயர்வெப்பநிலைகளில் பயன்படும் பொருட்களுக்கு மிக அவசியம். மேலும் தீக்காப்பு பொருட்களான தீச்செங்கல் (fire brick), கல்நார் (asbestos) போன்றவற்றிற்கு வெப்ப அதிர்ச்சித்தடை அதிகமாக இருப்பதால், வெப்பமாறுபாடுகளின் போது அவற்றின் இயற்பியல் பண்புகள் மாறாது.

5.13 உயர்வெப்பநிலைப் பொருள்கள் (high temperature materials)

உயர்வெப்பநிலைப் பொருள்கள் உலைகள், எந்திர உறுப்புகள் மற்றும் மின்காப்புப் பொருள்களில் பயன்படுத்தப்படுகின்றன. பொதுவாக இப்பொருள்களுக்குச் சரிவுத்தடை (creep resistance) மிக அதிகமாக இருக்க வேண்டும். மேலும் இவ்வகைப் பொருள்களின் உருகுநிலை மதிப்பு மிக அதிகமாக இருக்கவேண்டும். குறிப்பாய், உலைகளைக்கட்டப் பயன்படும் ஆக்ஸைடுகளான மக்னீசிய ஆக்ஸைடு, அலுமினிய ஆக்ஸைடு போன்றவை மிக உயர்ந்த உருகுநிலை உடையன. மேலும் இவ்வகைப் பொருள்கள் உலையில் உள்ள பொருள்களோடு சேர்ந்து வேதியியல் மாற்றம் ஏதும் ஏற்படுத்தாது. உயர்வெப்ப உலோகக் கலவைகள் பெரும்பாலும் இரும்பு மூலம் (iron base), நிக்கல் மூலம் மற்றும் கோபால்ட் மூலம் கொண்டவை. இவற்றிலுள்ள அனைத்து மூல உலோகங்களுக்கும் உருகுநிலை 1500°Cக்கு மேல் உள்ளது. இவ்வகை உலோகக் கலவைகளில் சரிவுத்தடையை அதிகப்படுத்துவதற்குப் பிரிகை கடினமாக்கு முறை (dispersion hardening method)ப் பின்பற்றப்படுகிறது. மேலும், உயர்வெப்ப வேலைப் பொருள்கள் தயார் செய்யக் குறைந்த சரிவுத் தடையுள்ள பொருள்களான நன்கு துகள்படுத்தப்பட்ட பொருள்கள் (fine grained materials), துகள் எல்லைகள் (grain boundaries) உள்ள பொருள்கள் ஆகியவற்றைப் பயன்படுத்தக்கூடாது. இன்று உயர் வெப்பநிலைப் பொருள்கள் உலைகள், மின்காப்புப் பொருள்கள் ஆகியவைகளில் பயன்படுவதுடன் வெப்ப எந்திரங்களிலும் (heat engines), ஆற்றல் மாற்று கருவிகளான காந்த நீரியல் ஆற்றல் மாற்றிகள் (magneto hydrodynamic converters), அணுஉலைகள் (nuclear reactors) ஆகியவைகளிலும் பயன்படுகின்றன.

மாதிரிக் கணக்குகள் :

1. 300 கெல்வினில் அலுமினியம், தாமிரம் ஆகியவற்றின் எலெக்ட்ரானிய தன்வெப்ப ஏற்புத் திறனின் மதிப்பினைக் கண்டுபிடி. கற் கெல்வின் வெப்பநிலையில் அலுமினியம், தாமிரம் ஆகியவற்றிற்கு ஃபெர்மி ஆற்றல் முறையே [illegible] எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு, 7.1 எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு ஆகும்.

$$C_{V\,(எலெக்ட்ரான்)} = \frac{\pi^2}{2} R n \frac{T}{T_F}$$

$$E_{fo} \approx E_f$$

$$\therefore\ C_{V(எலெக்ட்ரான்)} = \frac{\pi^2}{2} Pn \frac{T}{E_{fo}} k$$

ஓர் அலுமினிய அணுவிலுள்ள கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை மூன்று ஆகும். தாமிரத்தில் அதன் மதிப்பு ஒன்று என வைத்துக்கொள்வோம்.

தாமிரம் :

$$C_{V\,(\text{எலெக்ட்ரான்})} = \frac{\pi^2 \times 8.1 \times 1 \times 300 \times 1.38 \times 10^{-23}}{2 \times 7.1 \times 1.602 \times 10^{-19}}$$

$= 0.1455$ ஜூல்/அணு/கெல்வின்

அலுமினியம் :

$$C_{V(\text{எலெக்ட்ரான்})} = \frac{\pi^2}{2} \times \frac{8.1 \times 3 \times 300 \times 1.38 \times 10^{-23}}{11.7 \times 1.602 \times 10^{-19}}$$

$= 0.2649$ ஜூல்/அணு/கெல்வின்

ஆனால், அறை வெப்பநிலையில் எலெக்ட்ரானிய பருமன்மாறாத் தன்வெப்பஏற்புத் திறனின் மதிப்பை, அணிக்கோவை பருமன்மாறாத் தன்வெப்பஏற்புத்திறன் மதிப்பான 25 ஜூல்/அணு/கெல்வின் உடன் ஒப்புநோக்க, முந்தையதின் மதிப்பு மிகக் குறைவு ஆகும்.

2. ஒரு மில்லி மீட்டர் தடிமனுள்ள கண்ணாடி சாளரத்தின் (window) உள்ளேயும் வெளியேயும் வெப்பநிலை வேறுபாடு 22.2 கெல்வினாயுள்ளது. கண்ணாடியின் வெப்பங்கடத்துந்திறன் 1.05 வாட்டு/மீ/கெல்வின். ஒருமணி நேரத்தில் ஒரு சதுர மீட்டர் கண்ணாடி பரப்பின் வழியே வெப்பம் கடக்கும்போது ஏற்படும் ஆற்றலிழப்பினைச் சாதாரண முறையிலும், வெப்பத்தடை மூலமாயும் கணக்கிடுக.

கண்ணாடி சாளரத்தின்வழியே செல்லும் வெப்ப ஆற்றல்,

$$H = K\frac{dT}{dx}\,t\,A$$

இதில் $t = 3600$ செகண்டுகள் ; $A = 1$ மீ^{2}

$$\therefore H = 1.05 \times \frac{22.2}{1 \times 10^{-3}} \times 3600 \times 1$$

எனவே ஆற்றலிழப்பு $= 0.84 \times 10^8$ ஜூல் ஆகும்

மாற்றுமுறை (Alternative method) :

மின்தடை $'R' = \frac{l}{A\sigma}$ ஆகும். இதில் 'σ' என்பது மின்கடத்துந்திறன். மேலும் ஓமின்விதிப்படி,

மின்னூட்டங்கள் பாயும் வீதம் = மின்னோட்டம் = $\frac{\text{மின்னழுத்தவேறுபாடு}}{\text{மின்தடை}}$ என்பதை நன்கு அறிவோம். அதேபோல் வெப்பத்தடையைப் பின்வருமாறு எழுதலாம் :

வெப்பத் தடை $= \frac{l}{A\,K} = \frac{1 \times 10^{-3}}{1 \times 1.05} = 0.9524 \times 10^{-3}$ வாட்டு$^{-1}$ கெல்வின்

$$\text{வெப்பம் உள்ளே செலுத்தப்படும் வீதம்} = \frac{\text{கண்ணாடி சாளரத்தின் உள்ளேயும் வெளியேயும் உள்ள வெப்பநிலை வேறுபாடு}}{\text{வெப்பத்தடை}}$$

ஒரு மணி நேரத்தில் கண்ணாடி சாளரத்தின் வழியே செல்லும் வெப்ப ஆற்றல்

= வெப்பம் உள்ளே செலுத்தப்படும் வீதம் × 3600 செகண்டுகள்

$$= \frac{22.2}{0.9524 \times 10^{-3}} \times 3600 = 0.84 \times 10^{8}$$

எனவே ஆற்றலிழப்பு $= 0.84 \times 10^{8}$ ஜூல் ஆகும்

சுருக்கம்

1. திண்மப் பொருள்களின் வெப்பப் பண்புகள் அவற்றின் பருமன் மாறாத்தன்வெப்ப ஏற்புத்திறனால் தீர்மானிக்கப் படுகின்றன. பருமன் மாறாத் தன்வெப்பஏற்புத் திறனைப் பின்வருமாறு எழுதலாம்.

$$C_V = C_{V(\text{அணிக்கோவை})} + C_{V(\text{எலெக்ட்ரான்})}$$

$$\text{பொதுவாய்,}\ C_{V(\text{அணிக்கோவை})} > C_{V(\text{எலெக்ட்ரான்})}$$

2. டியூலாங்– பெடிட் விதிப்படி அனைத்து வெப்பநிலைகளிலும், பருமன் மாறாத் தன்வெப்பஏற்புத்திறனின் மதிப்பு 3R ஆகும். ஆனால், நடைமுறையில் அங்ஙனமில்லை.
3. டிபை மாதிரியே நடைமுறைக்குப் பொருந்தும்படியான பருமன்மாறாத் தன்வெப்பஏற்புத் திறனின் மதிப்பினை உயர்வெப்பநிலைகளிலும், தாழ்வெப்ப நிலைகளிலும் தருகிறது.

$$\text{தாழ்வெப்பநிலைகளில்,}\ C_V \,\alpha\, T^3$$

$$\text{உயர் வெப்பநிலைகளில்,}\ C_V = 3R$$

4. மூதுபழங்கொள்கையில் எலெக்ட்ரானிய பருமன்மாறாத் தன்வெப்பஏற்புத் திறன் $\frac{3}{2}R$ என உள்ளது. ஆனால், நடைமுறையில் எலெக்ட்ரானிய பருமன் மாறாத் தன்வெப்பஏற்புத் திறன் மதிப்பு $\frac{3}{2}R$ ஐ விட மிகமிகக் குறைவு.
5. திண்மப் பொருள்களில் உள்ள அணுக்கள் சீரிசையற்ற அதிர்வுகளில் அதிரும்போது திண்மப் பொருள்கள் விரிவடைகின்றன. திரவ, வாயுப் பொருள்களுடன் ஒப்பு நோக்கத் திண்மப் பொருள்களுக்கு வெப்ப விரிவு மிகக் குறைவு.
6. வெப்பங்கடத்தலுக்கு அணிக்கோவை அதிர்வுகளும், எலெக்ட்ரான்களும் உதவி செய்கின்றன. இதில் உலோகங்களில் எலெக்ட்ரான்களும் மின்கடத்தாப் பொருள்களில் அணிக்கோவை அதிர்வுகளும் பெரும்பங்கு வகிக்கின்றன.
7. உயர்வெப்பநிலைப் பொருள்களுக்கு, வெப்பந் தாங்கும் திறனும், சரிவுத் தடையும் மிக அதிகமாயிருக்க வேண்டும்.

வினாக்கள்

1. திடப்பொருள்களின் பருமன்மாறாத் தன்வெப்பஏற்புத்திறன் பற்றிய முதுபழங்கொள்கையினை விவரி. அஃது எங்ஙனம் நடைமுறைக்குப் பொருந்தி வருகிறது என்பதையும் குறிப்பிடுக.
2. திண்மப் பொருள்களின் பருமன் மாறாத் தன்வெப்பஏற்புத் திறன் பற்றிய ஐன்ஸ்டைனின் கவளக் கொள்கையை விவரி. உயர்வெப்பநிலைகளில் பருமன்மாறாத் தன்வெப்பஏற்புத் திறனின் மதிப்பு 3R க்கு எங்ஙனம் வருகிறது என்பதைக் காட்டு.
3. ஐன்ஸ்டைனின் திண்மப் பொருள்களின் பருமன்மாறாத் தன்வெப்பஏற்புத் திறன் பற்றிய கொள்கையின் குறைபாடுகளை எங்ஙனம் டிபை நீக்கினார்? டிபை கொள்கையின் கருத்தியலைக் கூறி, அக்கொள்கை எங்ஙனம் நடைமுறைத் தன்வெப்பஏற்புத் திறன் மதிப்புகளைத் தருகிறது என்பதையும் விவரி.
4. கடத்தல் எலெக்ட்ரான்களின் மூலம் நடக்கும் வெப்பங்கடத்துந்திறனுக்கானத் தொடர்பைத் தருவி. திண்மநிலைப் பொருள்களில் வெப்பங் கடத்தல் எவ்வழிகளில் நடைபெறுகிறது என்பதைப் பற்றியும் விவரி.
5. டிபை கொள்கையைப் பயன்படுத்தி 300 கெல்வினில் அலுமினியம், தாமிரம் ஆகியவற்றிற்குரிய அணிக்கோவை பருமன் மாறாத் தன்வெப்பஏற்புத் திறன் மதிப்பினைக் கண்டுபிடி. அலுமினியம், தாமிரம் ஆகிவற்றிற்கு டிபை வெப்பநிலை முறையே 390K, 315K ஆகும். (அலுமினியத்திற்கு $C_V \approx 24.82$ கிலோ ஜூல்/கிலோகிராம்அணு/கெல்வின். தாமிரத்திற்கு $C_V \approx 23.11$ கிலோ ஜூல்/கிலோ கிராம்அணு/கெல்வின்).
6. சிறுகுறிப்பு வரைக :
   (அ) போனான்கள்
   (ஆ) வெப்ப விரிவு
   (இ) உயர்வெப்பநிலைப் பொருள்கள்
   (ஈ) பொருள்களின் வெப்ப அதிர்ச்சித்தடை

மேற்கோள் நூற்பட்டியல் :

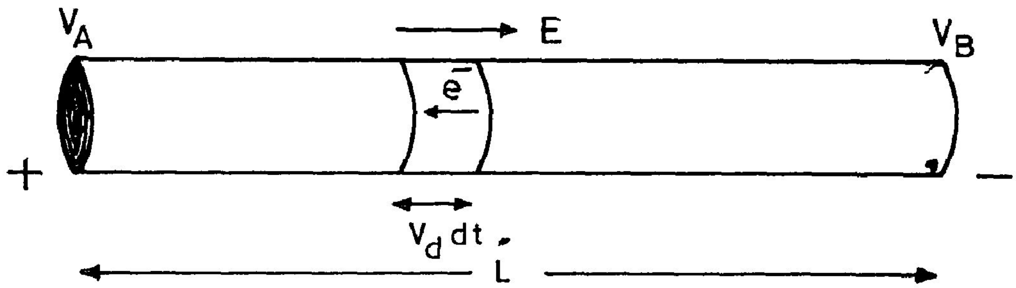
1. 'Thermal Conduction in Semiconductors' – C.M. Bhandari and D.M. Rose, Wiley Eastern Limited, New Delhi. 1988.
2. 'Electrons and Phonons' – J.M. Ziman, Oxford University Press, London, 1960.
3. 'The Theory of Specific Heats and Lattice Vibrations' – Jules De Launay, Solid State Physics, Acadamic Press, New York, Volume – 2, 1956.

6. உலோகங்களில் மின்கடத்தல்

6.1 அறிமுகம்

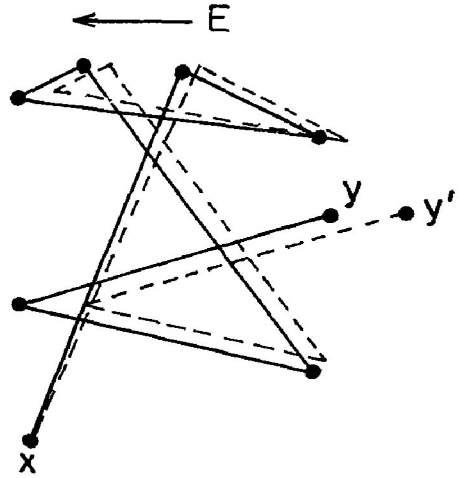
பொதுவாக உலோகங்களுக்கு மிகுதியான மின்கடத்தும் திறனும், மிகுதியான வெப்பங்கடத்தும் திறனும் இருக்கும். அதனால், உலோகங்களில் மின்கடத்தல் எங்ஙனம் நடைபெறுகிறது என்பதனையும் மின்கடத்தல் எந்தெந்த வழிகளில் மாற்றம் அடைகிறது என்பதனையும் இவ்வத்தியாயத்தில் தெரிந்து கொள்ளப்போகிறோம். மேலும், உலோகங்களில் நடைபெறும் வெப்ப அயனி உமிழ்வு, ஒளிமின் விளைவு, போன்ற பலவிளைவுகள் பற்றியும் சிறிது காணப்போகிறோம். உலோகங்களில் கடத்து எலெக்ட்ரான்கள் (conduction electrons) அதிகமாயுள்ளதால் அவற்றின் கடத்துந்திறன் மிகுதியாயுள்ளது. இதுபற்றிக் கீழே காண்போம்.

6.2 உலோகங்களில் மின்புலத்தின் செயலும், ஓமின் விதியும்



படம் 6.1 மின்புலத்தின் ஆளுகையில் எலெக்ட்ரானின் இயக்கம்

ஒருகடத்தியில் மின்புலம் செயல்படும்போது கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்கள் முடுக்கப்பட்டு அவைகளுக்கு ஒரு திசைவேகம் கிடைக்கிறது. அந்தத் திசைவேகமே **நகர்வு திசைவேகம்** (drift velocity) ஆகும். நகர்வு திசைவேகம் என்பது ஓர் எலெக்ட்ரானுக்கு மின்புலத்தில் கிடைக்கும் சராசரி திசைவேகமாகும். மேலும், அதன் திசை மின்புலத்திசைக்கு எதிர்த்திசையில் உள்ளது. அணிகோவையில் குலைவு (distortion) ஏற்படுத்தாத, அனுமதிக்கப்பட்ட பெரும மின்னோட்ட அடர்த்திகளில் எலெக்ட்ரானின் நகர்வு திசைவேகமதிப்பு (10^{-4}மீ/செகண்டு), அதன் சராசரி வெப்பத்திசை வேக மதிப்பினை (10^{6}மீ/செகண்டு) விட மிகக் குறைவாயுள்ளது. எனினும், மின் கடத்தும் கம்பியில் உள்ள மின்புல அமைப்பில் ஏற்படும் மாற்றத்தின்வேகம் ஒளியின் திசைவேகத்திற்குச் சமமாயுள்ளது. எனவே மின் சாதனங்களில் மின்னழுத்த வேறுபாட்டை உருவாக்கியவுடன் மின்னோட்டம் பாய்ந்து, அவை உடனே வேலை செய்கின்றன. அஃதாவது, மின்சாதனம் இணைக்கப்பட்ட மின்சுற்றின் ஒரு பகுதியிலுள்ள ஒரு கட்டற்ற எலெக்ட்ரான் மின் சாதனத்தின் வழியே சென்று மறுபகுதிக்கு வரும் வரை மின்னோட்டம் பாயாது என்று எண்ணாமல் அனைத்து கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களும் ஒரே நேரத்தில் ஒத்துழைப்பதால் மின்னோட்டம் உடனே பாய்கிறது எனக் கொள்ள வேண்டும்.



படம் 6.2 மின்புலத்தில் எலெக்ட்ரானின் இயக்கம். திண்மக் கோடுகள் xலிருந்து y வரை செல்வதற்குள் ஆறு மோதல்களுக்கு உள்ளாகும் ஓர் எலெக்ட்ரானின் இயக்கத்தைக் காண்பிக்கின்றன. இடைவெளி விட்டு வரையப்பட்ட கோடுகள் மின்புலத்தில் எலெக்ட்ரானின் இயக்கத்தைக் காண்பிக்கின்றன. மின்புலத்தின் எதிர்த்திசையில் எலெக்ட்ரானின் சீரான நகர்வினைக் கவனிக்க.

படம் 6.2இல் மின்புலத்தின் எதிர்த்திசையில் எலெக்ட்ரானுக்குக் கிடைக்கும் நகர்வு திசைவேகம் காண்பிக்கப்பட்டுள்ளது. கீழ்க்காணும் சில உதாரணங்கள் மூலம் நகர்வு திசைவேகத்தைப் பற்றிப் புரிந்துகொள்ளலாம். சிறிய குண்டு ஒன்று சற்று உயரத்தில் இருந்து தன்னிச்சையாய்க் கீழே விழும்போது மிக்க திசைவேகத்தோடும் அதேசமயம் ஒருபடிக்கட்டில் இருந்து அஃது உருண்டு கீழேவரும்போது குறைவான திசைவேகத்தோடும் வரும். படிக்கட்டில் உள்ள குண்டின் நிலையும் மின்புலத்தில் உள்ள எலெக்ட்ரான்களின் நிலையும் சமம். மேலும், தண்ணீர்செல்லும் குழாய் ஒன்றனை எடுத்துக்கொள்வோம். அதன் ஒருமுனையில் அழுத்தம் கொடுப்பதாய்க் கொள்வோம். அதனால், அழுத்த அலை குழாயினுள் மிகவேகமாயியங்கும். ஆனால், குழாயினுள் தண்ணீரின் வேகம் மிகக் குறைவாகவே இருக்கும். அணிக்கோவையினூடே எலெக்ட்ரான் இயங்க வேண்டியுள்ளது. அதனால், மின்புலத்தால் முடுக்கப்பட்ட எலெக்ட்ரான் அணிக்கோவையிலுள்ள நேர்மின் அயனியோடு மோத, அதன் இயக்க ஆற்றலின் ஒருபகுதி அணிக்கோவையின் அதிர்வு ஆற்றலாய் மாறிவிடுகிறது. அதனால், மின்புலம் செயல்படும்போது அணிக்கோவையின் ஊடே எலெக்ட்ரான் மாறா நகர்வு திசைவேகமான 'v_d'யுடன் இயங்குகிறது.

படம் 6.1 இல் காட்டியபடி நீளம் 'L' அலகுகளும், குறுக்குப் பரப்பு 'A' அலகுகளையும் உடைய ஒருமெல்லிய கம்பியை (wire) எடுத்துக் கொள்வோம்; 'n' என்பது அக்கம்பியிலுள்ள கடத்து எலெக்ட்ரான்களின் அடர்த்தியாகும். அதனால், மின்புலம் செயல்படும்போது கம்பியின் ஏதாவதொரு குறிப்பிட்ட தளம் வழியே 'dt' நேரத்தில்

கடக்கும் எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை $nA\mathrm{v}_d\,dt$ ஆகும். ஆகையால், dt செகண்டில் படத்தில் காட்டியுள்ளபடி கம்பியின் $\mathrm{v}_d\,dt$ என்னும் பாகத்தில் பாயும் மொத்த மின்னூட்டம்,

$$dq = ne\mathrm{v}_d\,dt\,A$$

அதனால், கம்பியில் பாயும் மின்னோட்ட மதிப்பு, $i = \frac{dq}{dt} = ne\,\mathrm{v}_d A$

ஆகையால், மின்னோட்ட அடர்த்தி (current density),

$$J = \frac{i}{A} = ne\,\mathrm{v}_d \qquad (6.1)$$

மின்கடத்துந்திறன் $\sigma = \frac{J}{E}$ (6.2)

இதில் 'E' என்பது மின்புலச்செறிவாகும். அதன் மதிப்பு மின்னழுத்த வாட்டத்திற்குச்சமம்.

$$\therefore\ \sigma = \frac{\frac{i}{A}}{-dV/dx} = \frac{-i}{A}\cdot\frac{dx}{dV}$$

$$\int_0^L i\,dx = -\sigma A\int_{V_A}^{V_B} dV$$

இதனைத்தொகையமிட்டு, மாற்றியமைக்க நமக்குக்கிடைப்பது

$$V_A - V_B = \frac{iL}{\sigma A} = iR \qquad (6.3)$$

இதில் $R = \frac{L}{\sigma A}\cdot$ மேலும், அஃது ஒரு மாறிலியாகும்.

அந்த மாறிலியை நாம் கடத்தியின் மின்தடை (resistance) என்கிறோம். மேலே காணும் சமன்பாடு **ஓமின் விதியாகும்.** அதன்படி ஒருகடத்தியின் இருமுனைகளிலும் உள்ள மின்னழுத்த வேறுபாடு அதனுள் பாயும் மின்னோட்டத்திற்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது.

மேலும், $\frac{1}{\sigma} = \rho$ (கடத்தியின் மின் எதிர்ப்புத் திறன் (resistivity)).

$$\therefore\ R = \frac{\rho L}{A}$$

(அல்லது) $\rho = \frac{RA}{L}$ ஓம் மீட்டர். (6.4)

6.3 மிகப் பழையகட்டற்ற எலெக்ட்ரான் கொள்கைமூலம் கடத்தியின் மின்கடத்துந் திறனைக் கணக்கிடல்

சென்ற பகுதியில் மின்கடத்துந்திறனைப் பேரளவுக் கணியங்களான நீளம், பரப்பளவு, மின்தடை போன்றவற்றின் மூலம் கண்டோம். இப்பகுதியில் அதனை நுண்ணளவுக் கணியங்களில் காண முனைவோம்.

ஒருகடத்தியில் மின்புலம் ஒன்று, செயல்படும்பொழுது அதன் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்கள் மின்புலத்தினால் முடுக்கப்படுகின்றன. இதனால், எலெக்ட்ரான்கள் மின்புலத்திற்கு எதிரான திசையில் விரைகின்றன. இதனையே நாம் மின்னோட்டம் என்கிறோம். மிகப்பழைய கொள்கைப்படி கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களை வாயு மூலக்கூறுகளுக்கு ஒப்பிடலாம். மிகப்பழைய கொள்கையின் சரத்துகளைச் சென்ற அத்தியாயத்திலேயே பார்த்தோம். அவைகளைப் பயன்படுத்திக் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களின் இயக்கத்தால் வரும் மின்னோட்டச் செறிவினைக் கணக்கிடலாம். ஓர்அலகு பருமனுள்ள கடத்தியில் 'n' கடத்து எலெக்ட்ரான்கள் உள்ளன எனக் கொள்வோம். இவ்வெலக்ட்ரான்கள் யாவும் தம்மிச்சையாகப் பல்வேறு திசைவேகங்களோடு இயங்கிக் கொண்டிருக்கும். இந்தத் திசைவேகப் பங்கீடானது கடத்தியினுடைய வெப்பநிலையைப் பொறுத்திருக்கும். மின்புலம் அதில் செயல் படாதபொழுது இவ்வெலக்ட்ரான்களின் சராசரித் திசைவேகம் எந்த ஒரு திசையிலும் சுழியாகத்தான் இருக்கவேண்டும். அவ்வாறில்லையெனில், அத்திசையில் ஒரு மின்னோட்டம் பாயும். ஆனால், மின்புலம் செயல்படாதபொழுது கடத்தியில் மின்னோட்டம் ஏதும் இராது. அதனால்

$$< \mathrm{v}_x > = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \mathrm{v}_{xi} = 0$$

என எழுதலாம். இங்கு v_{xi} என்பது x திசையில் i ஆம் எலெக்ட்ரானுடைய திசைவேகக் கூறாகும். இப்போது 'x' திசையில் E_x எனும் ஒரு மின்புலத்தைச் செலுத்துவோம். இப்புலத்தின் ஆளுகையில் ஓர் எலெக்ட்ரான் eE_x என்னும் மின்விசைக்கு ஆளாகும். 'e' என்பது எலெக்ட்ரானின் மின்னூட்டம். இவ் விசையினால் 'm' நிறையுடைய எலெக்ட்ரான் முடுக்கப்பெறும். இதனால் ஏற்படும் இயக்கத்தைப் பின்வருமாறு குறிக்கலாம்.

$$m \frac{d < \mathrm{v}_x >}{dt} = e\, E_x \tag{6.5}$$

இதனைத் தொகையமிட,

$< \mathrm{v}_x > = \dfrac{e\, E_x\, t}{m} +$ ஒரு மாறிலி. மின்புலம் செயல்படத்தொடங்கியதிலிருந்து நேரத்தைக் கணக்கிடுவதாய்க் கொண்டால் $t = 0$ எனும் போது $< \mathrm{v}_x > = 0$; மாறிலியின் மதிப்பும் சுழியாய்மாறும்.

இதனால், $<v_x> = \frac{e E_x t}{m}$ இச்சமன்பாட்டின் மூலம் எலெக்ட்ரானின் சாராசரித் திசைவேகம் நேரம் செல்லச் செல்ல அதிகரித்துக்கொண்டே செல்லுமென அறியலாம். கடத்தியிலுள்ள அனைத்து எலெக்ட்ரான்களும் ஒன்றோடொன்று இடைவினைபுரியாதவை என்றும், ஒன்றோடொன்று மோதிக் கொள்ளாதவை என்றும் கொண்டால், இவ்வெலெக்ட்ரான்களின் ஓட்டத்தால் ‘x’ திசையில் ஏற்படும் மின்னோட்டச் செறிவு,

$$J_x = ne < v_x > = \frac{ne^2 E_x t}{m}$$

இதன்படி ஒருமின்புலத்தைச் செயல்படுத்தும்போது கடத்தியில் மின்னோட்டச் செறிவு நேரமாகஆக உயர்ந்துகொண்டே செல்ல வேண்டும். ஆனால், ஓமின்விதிப்படி அவ்வாறு நடைபெறமுடியாது. அதனால், எலெக்ட்ரான்கள் மோதல்களில் ஈடுபடா என்னும் கருத்துச் சரியானதன்று.

எலெக்ட்ரான் ஒன்று ‘eE_x’ என்னும் மின்விசையால் முடுக்கப்பெற்றுச் செல்லும்போது அது நேர்மின்னூட்டம் கொண்ட அணிக்கோவை அயனியோடு மோதக்கூடும். அதன் விளைவாய் அது தன் உந்தத்தையும், ஆற்றலையும் முற்றிலும் இழந்துவிடும்; மீண்டும் அது மின்புலத்தால் முடுக்கப்பெற்று மேற்செல்லும்; மீண்டும் ஓர்அயனியோடு மோதும். இவ்வாறாய் எலெக்ட்ரான் மோதுகையினால் ஆற்றலிழப்பதனை அங்கே ஓர் உராய்வுவிசை (frictional force)ச் செயல்படுவதாய்க் கொள்ளலாம். ஓர் எலெக்ட்ரானுக்கு மின்புலத்தின் ஆளுகையினால் இயக்கநிலை மாறும் என்பது அனைவரும் அறிந்ததே. மாறிய இயக்கநிலையிலிருந்து அதன் ஆரம்ப தன்னிச்சையான இயக்க நிலைக்கு வர எலெக்ட்ரான் எடுத்துக்கொள்ளும் நேரத்தைத் **தளர்நேரம்** (relaxation time) ‘τ’ எனக் கூறுவர். இத்தளர்நேரத்தைப் பயன்படுத்தி, உராய்வு விசையை, $\frac{m < v_x >}{\tau}$ என எடுத்துக்கொள்ளலாம்.

மின்புலத்தில் எலெக்ட்ரானின் இயக்கத்திற்குரிய சமன்பாட்டைப் பின்வருமாறு எழுதலாம்.

$$\frac{m\, d < v_x >}{dt} + \frac{m < v_x >}{\tau} = e E_x \tag{6.6}$$

(அல்லது) $$\tau \frac{d < v_x >}{dt} = \frac{e E_x \tau}{m} - < v_x >$$

இதனை மேலும் மாற்றியமைக்க நமக்குக் கிடைப்பது,

$$\frac{d < v_x >}{\frac{e \tau E_x}{m} - < v_x >} = \frac{dt}{\tau}$$

இதனைத் தொகையப்படுத்த,

$$\log\left[\frac{e\,\tau\,E_x}{m} - <\mathrm{v}_x>\right] = \frac{-t}{\tau} + \text{ ஒரு மாறிலி}$$

(அல்லது) $$\frac{e\,\tau\,E_x}{m} - <\mathrm{v}_x> = A\,e^{-t/\tau}$$

இதில் A ஒரு மாறிலி. $t = 0$ எனும் போது $<\mathrm{v}_x> = 0$

$$\therefore A = e\,\tau\,E_x/m$$

$$\therefore <\mathrm{v}_x> = \frac{e\,\tau\,E_x}{m}(1 - e^{-t/\tau})$$

(அல்லது) $$<\mathrm{v}_x> = <\mathrm{v}_x>_\infty (1 - e^{-t/\tau})$$

இங்கே $<\mathrm{v}_x>_\infty = \frac{e\,\tau\,E_x}{m}$ என்பது இறுதியில் இருக்கக்கூடிய சராசரி திசைவேகமாகும். இதையே **நகர்வு திசைவேகம்** 'v_d' என்பர். எனவே

$$J_x = ne <\mathrm{v}_x> = \frac{ne^2\,\tau\,E_x}{m}\left(1 - e^{-t/\tau}\right) \tag{6.7}$$

மேற்கண்ட சமன்பாட்டின்படி மின்னோட்டச் செறிவு, நேரம் உயரஉயர அடுக்குக்குறி வகையில் உயரும். τ –ன் மதிப்பு வழக்கமாய் 10^{-14} செகண்டுகளில் இருக்கும். எனவே $e^{-t/\tau}$ன் மதிப்பு ஏறக்குறைய சுழியாகும். அதனால், இந்த நேரம்சார்ந்த மின்னோட்டச் செறிவு உயர்வு நமக்குப் புலனாவதில்லை. மின்னோட்டச் செறிவு அதனுடைய நிலையான (steady state) மதிப்பினில் இருப்பதை மட்டுமே உணர்கிறோம். இந்நிலையான மின்னோட்டச் செறிவு,

$$J_x = \frac{ne^2\,\tau\,E_x}{m} = ne\mathrm{v}_\mathrm{d}$$

$$\boxed{\therefore \sigma = \frac{J_x}{E_x} = \frac{ne^2\,\tau}{m}} \tag{6.8}$$

இதனால், உலொகத்தின் மின்கடத்துந்திறனானது ஓரலகு பருமனில் உள்ள கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கையையும், எலெக்ட்ரானின் மின்னூட்டத்தையும், தளர்நேரத்தையும் பொருத்திருக்கின்றது. மின்கடத்துந்திறனை எலெக்ட்ரானின் **நகர்வுதிறன்** (mobility) மூலம் கூறலாம். நகர்வு திறன் என்பது ஓரலகு மின்புலம் செயல்படுத்தப்பெறுவதால் உண்டாகும் நகர்வு திசைவேகமாகும்.

$$\text{அதனால், நகர்வு திறன் } \mu = \frac{\langle v_x \rangle_\infty}{E_x} = \frac{e\tau}{m}$$

$$\boxed{\therefore \sigma = ne\,\mu} \quad (6.9)$$

முடிவுகள்:

மின்கடத்துந்திறனுக்கு உள்ள தொடர்புகள் வெளி மின்புலத்தைச் சார்ந்து இருக்கவில்லை. இங்ஙனம் உலோகங்கள் பற்றிய ட்ரூடு-லாரென்ஸ் கருத்தியல் (மிகப்பழைய கொள்கை) உலோகங்களில் நடக்கும் மின் கடத்தல் முறைபற்றி நன்கு விளக்குகிறது. எனினும், எலெக்ட்ரான்களை நாம் வாயு மூலக்கூறுகளுடன் ஒப்பிடுவது நடைமுறையில் பொருந்துவதாயில்லை. மேலும், மிகப்பழைய கொள்கையின்படி மின்கடத்துந்திறன் மதிப்பு தனிவெப்பநிலை (absolute temperature)யின் வர்க்க மூலத்திற்கு எதிர்விகிதத்தில் உள்ளது. அதனைப் பின்வருமாறு நிரூபிக்கலாம். மிகப்பழைய கொள்கையில் எலெக்ட்ரானின் வாயு மூலக்கூறுகளுடன் ஒப்பிடுவதால் எலெக்ட்ரான்களின் இயக்க ஆற்றல்,

$$\frac{1}{2}m\bar{v}^2 = \frac{3}{2}kT$$

ஆனால், அதன் சராசரி வெப்பத் திசைவேகம் $\bar{v} = \frac{\lambda}{\tau}$. இதில் λ என்பது சராசரி மோதலிடைத்தூரம் ; τ என்பது தொடர்ச்சியான இருமோதல்களுக்கு இடையே உள்ள நேரம்.

$$\therefore \tau = \lambda\left(\frac{m}{3kT}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\therefore \sigma = \frac{ne^2\lambda}{m}\left(\frac{m}{3kT}\right)^{\frac{1}{2}}$$

ட்ரூடு-லாரென்சு கருத்தியல்படி சராசரி மோதலிடைத்தூரம் 'λ' ஏறத்தாழ அணு இடைத்தூர அளவில் இருக்கும். அதனால் அதனை வெப்பநிலைச் சார்ந்திராக் கணியம் எனக் கொண்டால்,

$$\sigma \propto \frac{1}{\sqrt{T}}$$

ஆனால், நடைமுறையில் மின்கடத்துந்திறன் தனிவெப்பநிலைக்கு எதிர்விகிதத்தில் உள்ளது. இது ட்ரூடு-லாரென்சு கருத்தியலில் உள்ள குறைபாடு ஆகும். மேலும், அதனால் அதிக மதிப்புள்ள மோதலிடைத்தூரத்திற்குரிய காரணத்தை விளக்கவும் முடியவில்லை.

உதாரணமாக 20°C இல் பழங்கொள்கையின்படி,

$$\lambda = \tau\bar{v} = 2.47 \times 10^{-14} \times 1.154 \times 10^5$$

$$= 28.5 \times 10^{-10} \text{ மீ } = 28.5 \text{ ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகள்.}$$

ஆனால் சோதனைகளில் சராசரி மோதலிடைத்தூரத்தின் மதிப்பு ஏறத்தாழ 300 ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகளுக்கு மேலே உள்ளது. மேலும் சராசரி மோதலிடைத்தூரம் வெப்பநிலைக்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது. அதனால், பழங்கொள்கை, உலோகங்களில் மின்கடத்தல் முறை பற்றி விளக்கினாலும், முழுமையான முறையில் விளக்கவில்லை என்பதை அறியலாம்.

6.4 மின்கடத்துந்திறன்பற்றிய கவளக் கொள்கை

சாமர்பெல்டின் கவளக் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான் கொள்கையின்படி மின் கடத்தலில் பங்கேற்கும் எலெக்ட்ரான்கள், ஃபெர்மி மட்டத்திற்கு அருகில் உள்ள ஃபெர்மி எலெக்ட்ரான்களே ஆகும். அதனால், ஃபெர்மி எலெக்ட்ரான்களின் தளர்நேரம் τ_f ஆகும். மேலும், இவ்வெலக்ட்ரான்கள் முற்றிலும் கட்டற்றவையல்ல. அவை அணிக்கோவையின் மடக்கு அல்லது சீரிடை நிலைஆற்றலில் நகர்வதால் இவ்வெலக்ட்ரான்களின் நிறை 'm'க்குப் பதிலாகச் செயலுறுநிறை m*ஐக் கையாள வேண்டும்.

$$\text{அதனால்,}\quad \sigma = \frac{ne^2\tau_f}{m^*} = \frac{ne^2\lambda_f}{m^* v_f} \tag{6.10}$$

இங்கு λ_f, v_f என்பன முறையே ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்ட எலெக்ட்ரான்களின் மோதலிடைத்தூரமும், திசைவேகமும் ஆகும். உதாரணமாய்த் தாமிரத்தை எடுத்துக்கொண்டால் அறைவெப்பநிலையில் தளர்நேரம் $= 2.7 \times 10^{-14}$ செகண்டு; மேலும், $m^* = 1.47\, m$

$$\text{அதனால்,}\quad \sigma = \frac{8.496 \times 10^{28} \times (1.6 \times 10^{-19})^2 \times 2.7 \times 10^{-14}}{1.47 \times 9.1 \times 10^{-31}} = 4.39 \times 10^7 \text{ ஓம்}^{-1} \text{ மீ}^{-1}$$

மேற்கண்ட மதிப்பு நடைமுறை மதிப்பான $\sigma = 5.76 \times 10^7$ ஓம்$^{-1}$ மீ$^{-1}$ உடன் பொருந்துவதாயுள்ளது. மேலும்,

$$\tau_f = \frac{\lambda_f}{v_f}$$

$$\text{அதனால்,}\quad \lambda_f = \tau_f v_f = 2.7 \times 10^{-14} \times 1.55 \times 10^6$$

$$= 4.19 \times 10^{-8} \text{மீ} = 419 \text{ ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகள்.}$$

ஆகவே கவளக் கொள்கையால் மோதலிடைத்தூரத்தின் அதிகமதிப்பிற்குரிய காரணத்தையும் அளிக்கமுடியும். மேலும், மின்கடத்துந்திறன், தனிவெப்பநிலைக்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது என்பதைப் பின்வருமாறு நிரூபிக்கலாம். அலை எந்திரவியலின்படி, உலோகத்திலுள்ள ஃபெர்மி எலெக்ட்ரான்களின் திசைவேகம் ஏறக்குறைய வெப்பநிலையைச் சார்ந்ததில்லை. அஃதாவது, ஃபெர்மி திசைவேகம் ஒரு மாறிலியாகும். ஆனால், மின்கடத்துந்திறனின் வெப்பநிலையைச் சார்ந்திருக்கும் பண்பு, எலெக்ட்ரான்

அலைகள்மீது அணிக்கோவை அதிர்வுகளால் உண்டாக்கப்படும் சிதறல்களால் (scatterings) வருகிறது. அதனால் மோதலிடைத்தூரத்தின் மதிப்பு அணு அதிர்வு வீச்சின் (A_0) இருமடிக்கு எதிர்விகிதத்தில் உள்ளது.

அஃதாவது, $$\lambda_f \,\alpha\, \frac{1}{A_0^2}$$

ஆனால், $$A_0^2 \,\alpha\, T$$

$$\therefore \sigma \,\alpha\, \lambda_f \,\alpha\, \frac{1}{T}$$

அஃதாவது, $$\sigma \,\alpha\, \frac{1}{T} \tag{6.11}$$

இங்ஙனமாய்க் கவளக்கொள்கை, மின்கடத்துந்திறன்பற்றி நடைமுறையில் காணும் நிகழ்ச்சிகளை நன்கு விளக்குகிறது.

6.5 தளர்நேரம், சராசரி (கட்டற்ற) மோதுகை நேரம்

தளர்நேரம் பற்றிச் சென்ற பகுதியில் சிறிது பார்த்தோம். சராசரி கட்டற்ற மோதுகைநேரம் (collision time) என்பது இருமோதல்களுக்கு இடையே உள்ள நேரம் என்று பார்த்தோம். ஆனால், இங்ஙனம் கூறும்போது மோதலுக்குப் பிறகு எலெக்ட்ரானின் திசை எத்திசையிலும் இருக்கலாம் என்பது நமது எடுகோள் ஆகும். அணிக்கோவையினால் எலெக்ட்ரானுக்கு ஏற்படும் சிதறல், திசைசாராப் பண்பு (isotropic) உடையதாயிருந்தால் சராசரி கட்டற்ற மோதுகை நேரமும் 'τ_c', தளர்நேரமும் 'τ' சமமாயிருக்கும். இங்ஙனமில்லாமல் சிதறல் அடைந்த எலெக்ட்ரான் திசை அதன் தொடக்கத் திசையிலிருந்து θ கோணத்தில் உள்ளது எனக்கொண்டால்.

$$\tau = \frac{\tau_c}{1 - \langle \cos\theta \rangle} \tag{6.12}$$

இதில் τ_c என்பது சராசரி கட்டற்ற மோதுகை நேரமாகும். இச்சமன்பாட்டின்படி தளர்நேரம் சராசரி கட்டற்ற மோதுகை நேரத்தைவிட அதிகமாயிருக்கலாம் என்பது தெளிவு. ஆனால், சிதறல் நிகழ்ச்சி (scattering phenomenon) திசைசாராப் பண்பை உடையதாயிருக்கும் போது,

$$\langle \cos\theta \rangle = 0$$

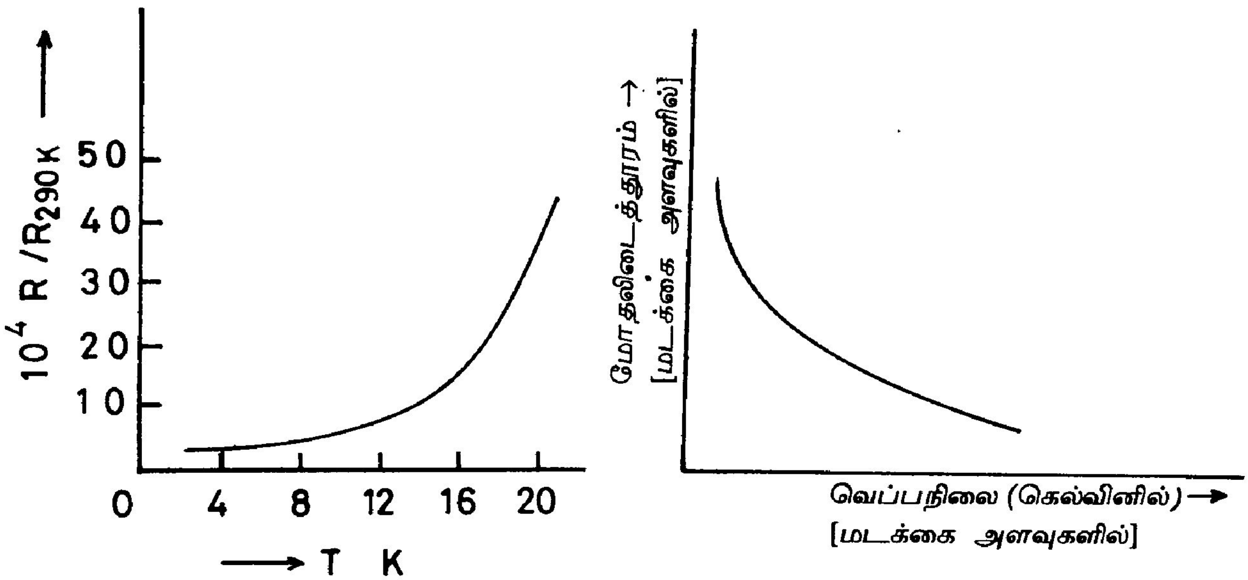
அதனால், $\tau = \tau_c$. அங்ஙனமிராவிட்டால் $\tau > \tau_c$.

6.6 உலோகத்திற்கு மின்எதிர்ப்புத்திறனை அளிக்கும் மூலங்கள் (sources)

உலோகங்களில் குறிப்பிட்ட அளவு மோதலிடைத்தூரம், தளர்நேரம் இருப்பதால் அவற்றின் மின்தடைகளும் குறிப்பிட்ட அளவு உள்ளன. அஃதாவது,

$$\sigma = \frac{ne^2 \tau}{m} \tag{6.8}$$

என்று பார்த்தோம், இதில் $\tau = \frac{\lambda_f}{v_f}$. இங்கு ஃபெர்மித்திசைவேகம் 'v_f' ஒரு மாறிலியாகும், அதனால், ஃபெர்மி மட்ட எலெக்ட்ரான்களின் மோதலிடைத்தூரமும், அவற்றின் தளர்நேரமும் நேர்விகிதத்தில் உள்ளன. வெப்பநிலை உயரும்போது மோதலிடைத்தூரத்தின் மதிப்புக் குறைகிறது. அதனால், மின்கடத்துந்திறனும் குறைகிறது. ஆனால், வெப்பநிலை குறைந்தால் மோதலிடைத்தூரத்தின் மதிப்பு மிகுதியாவதால் மின்கடத்துந்திறனின் மதிப்பும் கூடுகிறது. அதனால், சுத்தமானதும் முழுமையான தனிப் படிகநிலையிலுள்ள உலோகத்திற்குச் சுழி கெல்வின் வெப்பநிலையில் மோதலிடைத்தூரத்தின் மதிப்பு வரையிலியாகத்தான் இருக்கவேண்டும். அதனால், அதன் மின்கடத்துந்திறனும் அளவில்லாமல் இருக்கிறது; அஃதாவது, மின்எதிர்ப்புத்திறன் சுழியாயிருக்கிறது. அதனால் சிதறலை உண்டாக்கும் மூலங்கள் அணிக்கோவையிலுள்ள அயனி உள்ளகங்களாய் (ionic cores) இருக்கமுடியாது. அஃதாவது, அலை எந்திரவியலின் கருத்துப்படி முழுமையான மடக்குநிலை அல்லது சீரிடை அணிக்கோவையின் ஊடே ஓர்எலெக்ட்ரான் செல்லும்போது அது சிதறல் அடைவதில்லை. ஆனால், முழுமையற்ற சீரிடை அணிக்கோவையின் ஊடே அது செல்லும்போதுதான் அது சிதறல் அடைகிறது. அதனால் அப்பொருளுக்கு மின்எதிர்ப்புத்திறன் கிடைக்கிறது. படம் 6.3 (அ)வில் சோடிய உலோகத்தின் மின்எதிர்ப்புத்திறன் வெப்பநிலைக்கேற்ப வேறுபடும் விதத்தைக் காட்டப்பட்டுள்ளது. மிகக் குறைந்த வெப்பநிலைகளில் மின் எதிர்ப்புத்திறன் மாறாமல் இருப்பதை நோக்கவும். இஃது அணிக்கோவைக் குறைபாடுகளால் வருகிறது. படம் 6.3 (ஆ)வில் சுழிகெல்வின் வெப்பநிலையின்போது மோதலிடைத்தூரம் வரையிலியை எட்டுவதைக் காண்பிக்கப்பட்டுள்ளது. முழுமையற்ற அணிக்கோவை, வேற்றுப்பொருள் அணுக்களாலும், காலியிடங்களாலும், அணிக்கோவை அதிர்வுகளாலும் ஏற்படுகிறது. அதனால், உலோகங்களில் எலெக்ட்ரான் சிதறலை ஏற்படுத்த நிறைய மூலங்கள் உள. ஒவ்வொரு மூலத்தின் மூலம் எலெக்ட்ரானுக்கு ஒருகுறிப்பிட்ட தளர்நேரம் 'τ_j' கிடைக்கிறது. ஓரலகு நேரத்தில் ஒரு குறிப்பிட்ட மூலத்தின் மூலம் சிதறல் ஏற்படுத்துதற்குரிய நிகழ்தகவு $\frac{1}{\tau_j}$ (திசைசாராப் பண்புடைய சிதறலுக்கு) ஆகும். சிதறல்களின் நிகழ்தகவுகளைக் கூட்டி, அதன்மூலம் சரிநிகர் தளர்நேரத்தை (equivalent relaxation time)ப் பின்வருமாறு எழுதலாம்.



(அ) குறைந்த வெப்பநிலையில் சோடியத்தின் மின்எதிர்ப்புத்திறன் வேறுபடும் விதம்

(ஆ) வெப்பநிலைக்கும் மோதலிடைத் தூரத்திற்கும் இடையே வரையப்பட்ட வரைபடம்

படம் 6.3.

$$\frac{1}{\tau} = \sum_j \frac{1}{\tau_j}$$

ஓர் உலோகத்தில் குறிப்பிட்ட அளவு வேற்றுப்பொருள் அணுக்களும், காலியிடங்களும் உள்ளதாய்க் கொள்வோம். அவற்றின்மூலம் உலோகத்தின் எலெக்ட்ரான்களுக்குக் கிடைக்கும் தளர்நேரம் τ_r என்க. மெத்தீசென்னின் விதி (Matthiessen's rule)ப்படி உலோகங்களுக்கும், நீர்த்த உலோகக் கலவைகளுக்கும் (dilute alloys) சரிநிகர் தளர்நேரத்தினைப் பின்வருமாறு எழுதலாம்.

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_T} \quad (6.13)$$

இதில் τ_r என்பது முன்பே கூறியபடி உலோகத்திலுள்ள அணிக்கோவைக் குறைபாடுகளால் வரும் தளர்நேரமாகும். அது வெப்பநிலையைச் சார்ந்திருப்பதில்லை. ஏனெனில், குறைபாடுகளின் மூலம் ஏற்படும் மோதலிடைத்தூரமான λ_r இன் மதிப்பு வெப்பநிலையைச் சார்ந்திரா ஒருமாறிலியாயுள்ளது. 'τ_T' என்பது அணிக்கோவை அதிர்வுகளால் வரும் தளர்நேரமாகும். அணிக்கோவை அதிர்வுகள் அல்லது சிதறல்கள் வெப்பநிலையைச் சார்ந்தவை. ஆகையால் 'τ_T' என்னும் தளர்நேரக்கூறு வெப்பநிலையைச் சார்ந்ததாகும். அதனால் உலோகத்தின் மின் எதிர்ப்புத்திறன்,

$$\rho = \frac{m}{ne^2}\left(\frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_T}\right)$$

(அல்லது) $$\rho = \rho_r + \rho_T \qquad (6.14)$$

இதில் $\rho_r = \frac{m}{ne^2 \tau_r}$; இஃது ஒருமாறிலியாகும். மற்றும் $\rho_T = \frac{m}{ne^2 \tau_T}$; இது வெப்பநிலையைச் சார்ந்ததாகும்.

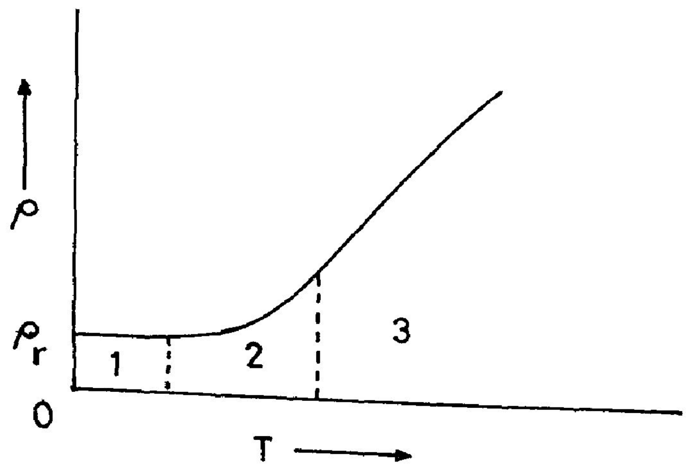
சிறப்பு நேர்வுகள் :

(1) மிகக்குறைந்த வெப்பநிலையில் $\rho_T \approx 0$. எனவே $\rho \approx \rho_r$

(2) மிக உயர்ந்த வெப்பநிலைகளில் $\rho_T >> \rho_r$. எனவே $\rho \approx \rho_T$

வெப்பநிலையால் உலோகத்தின் மின்எதிர்ப்புத்திறனில் ஏற்படும் மாற்றம் :

உலோகங்களின் மின் எதிர்ப்புத்திறன் வெப்பநிலைமாறுபாட்டால் மிகுந்த அளவு மாறுகிறது. சுழிகெல்வின் வெப்பநிலையில் உலோகத்தின் மின்எதிர்ப்புத்திறனின் மதிப்புக் குறைவாயும் மாறாமதிப்புடையதாயும் இருக்கும். அஃதாவது, $\rho \approx \rho_r$. ஏனெனில், மிகக் குறைந்த வெப்பநிலைகளில் அணிக்கோவை அதிர்வுகளால் ஏற்படும் எலெக்ட்ரான்களின் சிதறல்கள் புறக்கணிக்கத்தக்க அளவு இருக்கும். அதனால், உலோகத்தின் மொத்த மின்எதிர்ப்புத்திறன், மிகக்குறைந்த வெப்பநிலைகளில் அணிக்கோவை குறைபாடுகளின் மதிப்பின்மூலம் தீர்மானிக்கப்படுகிறது. படம் 6.4 இன் பகுதி (1) இதனைக் காட்டுகிறது.



படம் 6.4 வெப்பநிலை மாற்றத்தால் உலோகத்தின் மின்எதிர்ப்புத்திறனில் ஏற்படும் மாற்றம்.

அதே படத்தின் பகுதி (2), வெப்பநிலையானது குறைந்த மதிப்பிலிருந்து சிறிது சிறிதாக உயரும்போது மின் எதிர்ப்புத்திறன் எங்ஙனம் மாறுபடுகிறது என்பதைக்

காட்டுகிறது. இப்பகுதியில் உலோகத்தின் மின்எதிர்ப்புத்திறன் அதன் வெப்பநிலையின் 'n' அடுக்குக்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது. அஃதாவது,

$$\rho \propto T^n . \quad \text{இதில் } n \approx 5.$$

படத்தின் பகுதி (3) இல் உலோகத்தின் மின்எதிர்ப்புத்திறன் வெப்பநிலைக்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது. இந் நிகழ்ச்சி வெப்பநிலை 50 கெல்வினுக்கு மேல் இருக்கும்போது உண்டாகிறது. இக்குணம் உலோகத்தின் உருகுநிலைவரை நிலைத்துள்ளது. குறிப்பாய்ப் பொருளின் டிபை வெப்பநிலைக்கு மேல் உள்ள வெப்பநிலைகளில் அணிக்கோவை அதிர்வுகளின் ஆற்றல் வெப்பநிலையோடு நேர்விகிதத்தில் உயருகிறது. இந் நிலையில் மோதலிடைத்தூரம் அணிக்கோவை அதிர்வீச்சின் இருமடிக்கு எதிர்விகிதத்தில் உள்ளது. அஃதாவது,

$$\lambda \propto \frac{1}{A_0^2}$$

இதில் A_0 என்பது அணிக்கோவை அதிர்வின் வீச்சாகும்.

ஆனால், $A_0^2 \propto T$; எனவே $\lambda \propto \frac{1}{T}$ அல்லது $\rho \propto T$.

எனவே டிபை வெப்பநிலைக்கு மேலுள்ள வெப்பநிலைகளில் வெப்பநிலைக்கும் மின்எதிர்ப்புத்திறனுக்கும் இடையே ஒரு வரைபடம் வரைந்தால் அது நேர்கோடாயிருக்கும். மேலும், அது பின்வரும் வாய்பாட்டிற்குப் பொருந்துவதாயும் இருக்கும்.

$$\rho = \rho_r + aT \quad \text{(மெத்தீசென்னின் விதி)} \tag{6.15}$$

இதில் ρ_r, a ஆகியவை மாறிலிகளாகும். கடின உலோகங்களுக்கு டிபை வெப்பநிலை மிகஉயர்ந்தும், மென்மையான உலோகங்களுக்கு டிபை வெப்பநிலை தாழ்ந்தும் இருக்கிறது. மேலும், டிபை வெப்பநிலையை உலோகத்தின் மின்எதிர்ப்புத்திறனுக்கும் வெப்பநிலைக்கும் இடையே வரையப்பட்ட வரையிலிருந்து கண்டுபிடிக்கலாம். ஏனெனில்,

$$\rho \propto \frac{T}{M\,\theta_D^2} \tag{6.16}$$

இதில் 'M' என்பது உலோக அணுவின் நிறை ; θ_D என்பது டிபை வெப்பநிலை, இங்ஙனமாய் உலோகத்தின் மீட்சிப் பண்புகளைத் தீர்மானிக்கும் டிபை வெப்பநிலையும் மின்எதிர்ப்புத் திறனும் ஒன்றனையொன்று சார்ந்திருக்கின்றன. (அல்லது) உலோகத்தின் மின்எதிர்ப்புத் திறனும் அதன் தன்வெப்ப ஏற்புத்திறனும் ஒன்றனையொன்று சார்ந்துள்ளன.

6.7 உலோகக்கலவைகளின் மின்எதிர்ப்புத்திறன்

ஒருகுறிப்பிட்ட வெப்பநிலையில் ஒருசுத்தமான உலோகத்தில் வேற்று அணுக்களைச் சிறிதுசிறிதாய்ச் சேர்த்துக்கொண்டேபோனால், அதன் மின்எதிர்ப்புத்திறனும் கூடிக்கொண்டே போகும். அஃதாவது, உலோகக்கலவைகள் உருவாகும்போது அடிப்படை உலோகத்தின் மின்எதிர்ப்புத் திறனைவிட உலோகக்கலவையின் மின்எதிர்ப்புத் திறன் அதிகமாயிருக்கும். அதனால், உலோகக்கலவையின் மின்எதிர்ப்புத்திறனின் மதிப்பு அடிப்படை உலோகத்தில் எந்த அளவிற்கு வேற்றுஅணுக்கள் கலக்கப்பட்டுள்ளன என்பதனைப் பொருத்துள்ளது.

நார்டிம்மின் விதி (Nordheim's rule)ப்படி ஒருகுறிப்பிட்ட வெப்பநிலையில் உலோகக் கலவையின் அணிக்கோவை குறைபாடுகளால்வரும் மின்எதிர்ப்புத் திறனைப் பின்வருமாறு எழுதலாம்.

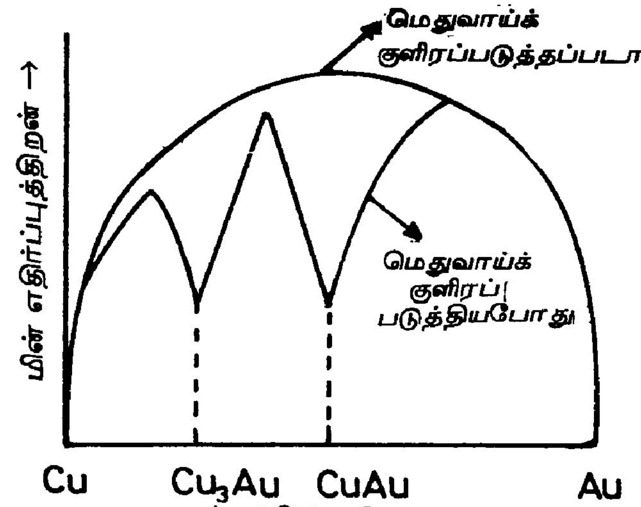
$$\rho_r(x) = A\,x\,(1-x) \qquad (6.17)$$

இதில் 'x' என்பது வேற்றுப்பொருளின் செறிவு ஆகும் ; 'A' என்பது அடிப்படை உலோகத்தையும், வேற்றுப்பொருளையும் சார்ந்துள்ள ஒருமாறிலியாகும். 'A' யின் மதிப்பு, அணுவின் இணைதிறனுக்கும், அணு அளவிற்கும் நேர்விகிதத்தில் உள்ளது. நீர்த்த (dilute) உலோகக் கலவைகளுக்கு,

$$\rho_r(x) \approx A\,x \qquad (6.18)$$

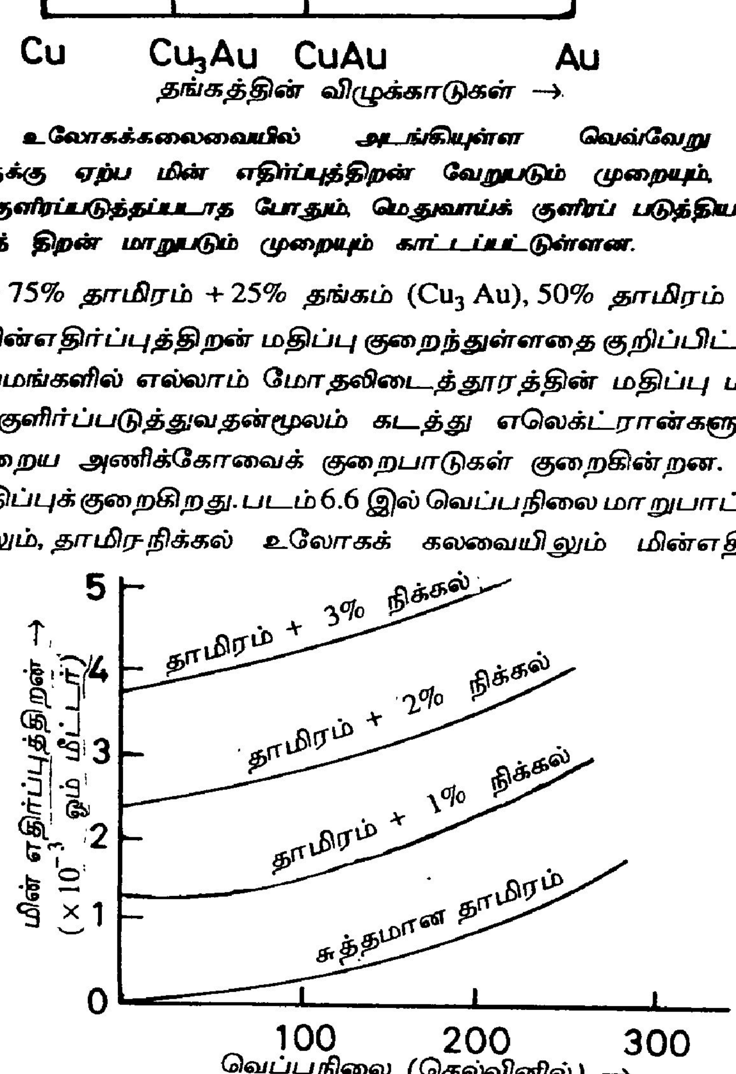
உதாரணமாய்த் தாமிரத்தில் தங்கத்தைச் சிறிது சிறிதாய்க் கலப்பதாய்க் கொள்வோம். இங்ஙனம் தங்க அணுக்கள் தாமிரத்தில் கலக்கப்படும்போது அணிக்கோவையில் புள்ளிக் குறைபாடுகள் மிகுதியாகின்றன. வேற்றுஅணுக்களின் செறிவுகூடக்கூடச் சிதறல் மையங்களும் கூடிக்கொண்டே போகும். ஏனெனில், தாமிர அணிக்கோவையிலிருந்து தாமிர அணுக்கள் நீக்கப்பட்டுத் தங்க அணுக்கள் அந்த இடங்களில் அமரும்போது அணிக்கோவையின் சீரிடையில் குறைபாடுகள் தோன்றிக் கடத்து எலெக்ட்ரான்களுக்குப் புதிதாய்ச் சிதறல் மையங்கள் கிடைக்கின்றன.

படம் 6.5 இல் தாமிர–தங்க உலோகக்கலவையில் அடங்கியுள்ள வெவ்வேறு அணுக்களின் விழுக்காடுகளுக்கேற்ப மின்எதிர்ப்புத்திறன் வேறுபடும்விதம் காட்டப்பட்டுள்ளது. மெதுவாகக் குளிரப்படுத்தாதபோது திண்மக்கரைசல் ஒழுங்கற்று இருக்கும். அந்நிலையில் தாமிரமும், தங்கமும் 50 : 50 என்ற விகிதத்தில் இருக்கும்போது மின் எதிர்ப்புத்திறன் பெருமநிலையை அடைகிறது. இது தாமிர அணிக்கோவையில் அல்லது தங்க அணிக்கோவையில் ஏற்படும் பெருமக்குலைவைக் காட்டுகிறது. ஆனால், உலோகக் கலவையை ஒருகுறிப்பிட்ட வெப்பநிலையில் மெதுவாகக் குளிரப்படுத்தும்போது அணுக்கள் அனைத்தும் ஒழுங்காக அணிக்கோவைப் புள்ளிகளில் அமர்ந்து குறைந்த ஆற்றலுடைய இயலமைப்பினை உருவாக்கும். அதனால், அணிக்கோவையின் சீரிடை (periodicity) நிலைப்படுத்தப்பட்டுச் சிதறல் மையங்கள் குறைக்கப்படுகின்றன. இதனால், மின் எதிர்ப்புத்திறனும் குறைகிறது. படம் 6.5 இல் காட்டியபடி ஒழுங்கான அமைப்பில் உள்ள



படம் 6.5 தாமிர—தங்க உலோகக்கலவையில் அடங்கியுள்ள வெவ்வேறு அணுக்களின் விழுக்காடுகளுக்கு ஏற்ப மின் எதிர்ப்புத்திறன் வேறுபடும் முறையும், அக்கலவையை மெதுவாய்க் குளிர்படுத்தப்படாத போதும், மெதுவாய்க் குளிரப் படுத்தியபோதும் அதன் மின் எதிர்ப்புத் திறன் மாறுபடும் முறையும் காட்டப்பட்டுள்ளன.

உலோகக்கலவைகளான 75% தாமிரம் + 25% தங்கம் (Cu_3 Au), 50% தாமிரம் + 50% தங்கம் (*Cu Au*) ஆகியவற்றில் மின்எதிர்ப்புத்திறன் மதிப்பு குறைந்துள்ளதை குறிப்பிட்ட சிறுமங்கள் காட்டுகின்றன. அச்சிறுமங்களில் எல்லாம் மோதலிடைத்தூரத்தின் மதிப்பு மிகுந்திருக்கும். மேலும், மெதுவாய்க் குளிர்ப்படுத்துவதன்மூலம் கடத்து எலெக்ட்ரான்களுக்குச் சிதறல் மையங்களாயுள்ள மற்றைய அணிக்கோவைக் குறைபாடுகள் குறைகின்றன. இதன் மூலம் மின்எதிர்ப்புத்திறன் மதிப்புக் குறைகிறது. படம் 6.6 இல் வெப்பநிலை மாறுபாட்டிற்கு ஏற்பச் சுத்தமான தாமிரத்திலும், தாமிர நிக்கல் உலோகக் கலவையிலும் மின்எதிர்ப்புத்திறன்



படம் 6.6 வெப்பநிலை மாறுபாட்டிற்கு ஏற்பச் சுத்தமான தாமிரத்திலும், நீர்த்தத்தாமிர-நிக்கல் உலோகக் கலவையிலும் மின்எதிர்ப்புத்திறன் வேறுபடும்விதம்

வேறுபடும்விதம் காண்பிக்கப்பட்டுள்ளது. மேலும், இதில் குறைந்த விழுக்காடுகள் நிக்கலை உடைய தாமிர உலோகக்கலவை எடுத்துக் கொள்ளப்பட்டுள்ளது. மிகக்குறைந்த வெப்பநிலைகளில் மின் எதிர்ப்புத்திறன் வெப்பநிலையின் மும்மடிக்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது. ஆனால், சாதாரண வெப்பநிலைகளில் மின்எதிர்ப்புத்திறன் வெப்பநிலையோடு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது. மேலும், தாமிர அணிக்கோவையில் நிக்கலைச் சேர்க்கும்போது அதன் மின் எதிர்ப்புத்திறன் எல்லா வெப்பநிலைகளிலும் கூடிக்கொண்டே செல்கிறது. தாமிரத்தின் மின்எதிர்ப்புத்திறனில் ஏற்படும் உயர்வு அதில் சேர்க்கப்படும் நிக்கலின் விழுக்காடுகளுக்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது. இதனையே சமன்பாடு (6.18)-ம் காட்டுகிறது. மேற்கண்ட வரைபடங்களின் மூலம், மிகக்குறைந்த மின்எதிர்ப்புத்திறனுள்ள வெள்ளியைத் தாமிரத்தில் கலந்தாலும் கூட, தாமிரத்தின் மின் எதிர்ப்புத்திறன் அதிகரிக்குமேயன்றி குறையாது என்பதும், உலோகக்கலவையின் மின்எதிர்ப்புத்திறன், அதன் கூறு (component) உலோகங்களின் மின்எதிர்ப்புத்திறன்களை விட அதிகமாய் இருக்கும் என்பது தெளிவு.

6.8 மாறுதிசை மின்புலத்தில் மின்கடத்துந்திறன்

இதுவரை நிலைமின்புலத்தில் உலோகங்களின் மின்கடத்துந்திறனைப் பார்த்தோம். இனி மாறுதிசை மின்புலத்தில் மின்கடத்துந்திறன் எங்ஙனம் மாறுகிறது என்பதைக் காண்போம். பொதுவாக மின்புலத்தின் அதிர்வெண் கூடும்போது மின்கடத்துந்திறனின் மதிப்புக் குறைகிறது. மாறுதிசை மின்புலத்தில் எலெக்ட்ரான் மீதுள்ள விசை

$$F = -eEe^{i\omega\tau}$$

அதனால் அதிக அதிர்வெண் உள்ள மாறுதிசை மின்புலத்தில் மின்னோட்ட அடர்த்தி

$$J = \frac{ne^2\tau E}{m(1 - i\omega\tau)} \tag{6.19}$$

இதில் τ என்பது எலெக்ட்ரானின் தளர்நேரமாகும்.

அதிர்வெண்ணைச் சார்ந்துள்ள மின்கடத்துந்திறன்

$$\sigma(\omega) = \frac{ne^2\tau}{m(1 - i\omega\tau)} = \sigma_0\left(\frac{1 + i\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2}\right) \tag{6.20}$$

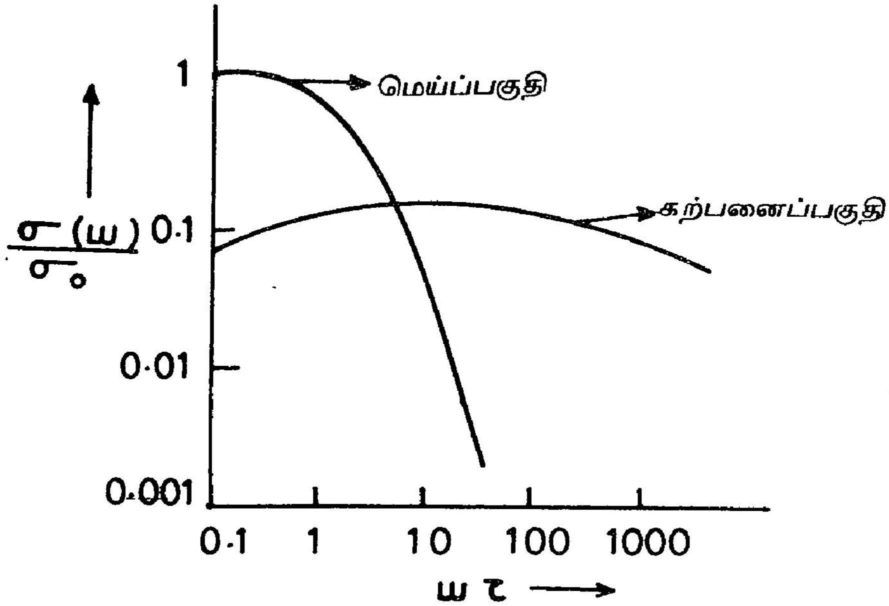
இதில் $\sigma_0 = \dfrac{ne^2\tau}{m}$, நிலைமின்புலத்தில் மின்கடத்துந்திறன் ஆகும்.

உயர்அதிர்வெண்களில், $\omega\tau >> 1$. எனவே $\sigma(\omega) = \sigma_0\left(\dfrac{1}{(\omega\tau)^2} + \dfrac{i}{\omega\tau}\right)$

(அல்லது)

$$\sigma(\omega) = \frac{ne^2}{m\omega^2\tau} + \frac{ine^2}{m\omega} \tag{6.21}$$

$\omega\tau >> 1$ என இருக்கும்போது $\sigma(\omega)$ வின் கற்பனைப் பகுதி $\sigma(\omega)$ வின் மதிப்பில் பெரும்பங்கு வகிக்கிறது. படம் 6.7 இல் இது காண்பிக்கப்பட்டுள்ளது. மேலும், இது தளர்நேரத்தைச்சார்ந்[illegible] இல்லை.



படம் 6.7 மின்கடத்துந்திறனின் மெய், கற்பனைப் பகுதிகளுக்கும், $\omega\tau$–க்கும் இடையே வரையப்பட்ட வரைபடம்.

உயர்அதிர்வெண் மாறுதிசைமின்புலம் உலோகத்தினுள் செலுத்தப்படும்போது பெரும்பாலும் அதனால் உலோகத்தினுள் சீராய் ஊடுருவிச்செல்லமுடியாது. ஆனால், அதற்குப் பதிலாய் அடுக்குக்குறி சார்பில் சிதைவு அடைகிறது. இச்சிதைவை ஊடுருவிய ஆழம் (penetration depth) அல்லது மேல்ஆழம் (skin depth) என்ற கணியத்தின் மூலம் விளக்கலாம். இங்கு மேல்ஆழம் என்பது உலோகத்தின் மேற்புறப்பரப்பில் எவ்வளவு ஆழம்வரை மின்புலம் ஊடுருவியுள்ளது என்பதைக் குறிக்கிறது. குறிப்பாய் ஒளியியற்பகுதியில் உலோகங்களுக்கு மேல்ஆழம் 200 ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகள் உள்ளன. மேல்ஆழம் என்பது உலோகத்தின் மேற்புறப்பரப்பிலிருந்து உலோகத்தினுள் மின்புலச்செறிவின் மதிப்பு $\frac{1}{e}$ என்று குறைந்து காணப்படும் புள்ளிவரை உள்ள தூரமாகும். மேல் ஆழத்தின் மதிப்பு மின்காந்த அலையின் அலை நீளத்திற்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது. மேலும், அது பொருளின் மின் எதிர்ப்புத் திறனையும் சார்ந்துள்ளது. குறிப்பாய் மின்கடத்தாப் பொருள்களுக்கு மேல்ஆழ மதிப்பு மிக அதிகமாக இருக்கும். இம்மேல் ஆழக் கருத்தியல்மூலம் உலோகங்களின் ஒளியியற் குணங்களை விளக்கலாம். மாறுதிசை மின்னோட்டம் பொருளின்கண் இருக்கும்போது எலெக்ட்ரானிய முனைவாக்கம் (electronic polarisation) ஏற்படுகிறது. குறிப்பாய் உயர்அதிர்வெண் உடைய மின்புலத்தில் முனைவாக்கம்,

$$P = \frac{-ne^2E}{m\,(\omega^2 + i\,\frac{\omega}{\tau})} \tag{6.22}$$

மின்கடத்தாப் பொருள் மாறிலி (dielectric constant) அல்லதுஒப்புமைமின்மறுப்புத் திறன் (relative permittivity),

$$\varepsilon_r = 1 + \frac{P}{\varepsilon_o E} = n_o^2 \tag{6.23}$$

இதில் n_o என்பது பொருளின் ஒளிவிலகலெண் ஆகும்.

$$\text{எனவே} \quad \varepsilon_r(\omega) = 1 - \frac{ne^2}{\varepsilon_o\, m\left(\omega^2 + \frac{i\omega}{\tau}\right)} \tag{6.24}$$

இதன்மூலம் $\tau \to \infty$ என இருக்கும்போது, மின்கடத்தாப்பொருள் மாறிலி நேர்க்குறியுடையதாயும், மெய்யானதாயும் இருக்க, $\omega^2 > \frac{ne^2}{\varepsilon_o m}$ என இருக்கவேண்டும். தளர்நேரம் $\tau \to \infty$ என வைத்துக்கொண்டு பின்வரும் நேர்வுகளைப் பார்ப்போம்.

நேர்வு 1:

$\frac{ne^2}{\varepsilon_o m\, \omega^2} > 1$ எனஇருந்தால் ஒப்புமைமின்மறுப்புத்திறன்எதிர்க்குறியுடையதாகமாறும். எனவே ஒளிவிலகலெண் சிக்கல் கணியமாகிவிடும். பொருளின் ஒப்புமை மின்மறுப்புத்திறன் எதிர்க்குறியுடையதாயிருக்கும்போது அதனுள் மின்காந்த அலைகள் ஊடுருவிச் செல்லமுடியாது. ஏனெனில், அத்தகைய ஊடகத்தில் அவ்வலைகள் முழுமையான பிரதிபலிப்பினை அடைகின்றன. உலோகங்களுக்கு இத்தகைய நிலை கண்ணுறு ஒளிப்பகுதியில் ஏற்படுகிறது.

நேர்வு 2:

$$\frac{ne^2}{\varepsilon_o m\, \omega^2} = 1 \quad \text{அல்லது} \quad \frac{ne^2}{\varepsilon_o m} = \omega^2$$

இத்தகைய நேர்வின்போது பொருளின் ஒப்புமைமின்மறுப்புத்திறன் சுழியாகிறது. இதற்குரிய அதிர்வெண்ணை வெட்டு அதிர்வெண் (cut off frequency) அல்லது பிளாஸ்மா அதிர்வெண் 'ω_p' என்பர். அதனால்,

$$\varepsilon_r(\omega_p) = 0 \tag{6.25}$$

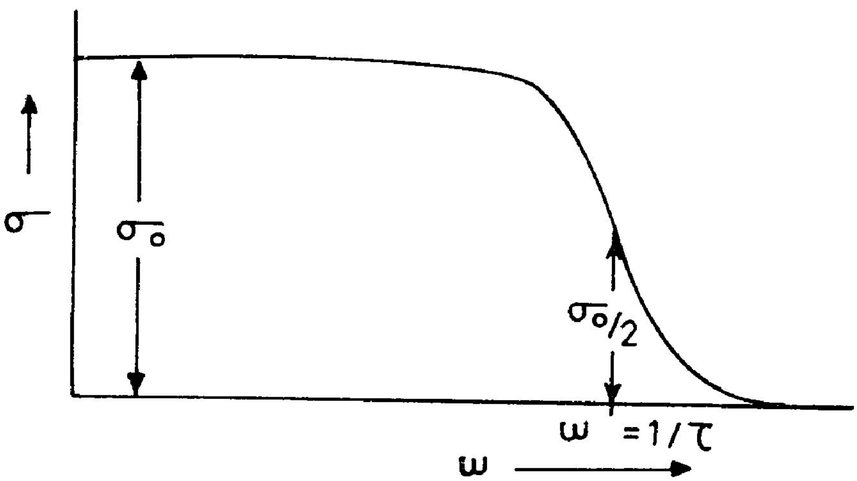
இந்நிலையில் பொருள், மின்காந்த அலை உட்புகும் ஊடகமாய் மாறும். அஃதாவது, உலோகத்திலுள்ள கடத்து எலெக்ட்ரான்களால் ஆன வாயு ஒளிபுகும் தன்மையுடையதாய் மாறும். பிளாஸ்மா அலை நீளத்தைப் பின்வருமாறு எழுதலாம். $\lambda_p = 2\pi C/\omega_p$. இதில் C என்பது ஒளியின்திசைவேகமாகும். கார உலோகங்களுக்குப் பிளாஸ்மா அலைநீளம் புற ஊதாப்பகுதியில் உள்ளது. அதனால், அவை புறஊதா ஒளி உட்புகும் ஊடகங்களாய் விளங்குகின்றன.

நேர்வு 3:

$\frac{ne^2}{\varepsilon_0 m \omega^2} < 1$ என இருக்கும் போது பொருளின் ஒளிவிலகலெண் நேர்க்குறியுடையதாயும், மெய்யானதாயும் மாறும். இத்தகையநிலை கண்ணாடி போன்ற மின்கடத்தாப் பொருள்களுக்குக் கிடைக்கும். ஒருபொருளின் ஒளிவிலகலெண் நேர்க்குறியுடையதாயிருந்தால் அஃது ஒளிபுகும் ஊடகமாயிருக்கும். பெரும்பாலும் இத்தகைய நேர்வு உலோகங்களுக்கு ஏற்படாது. மேற்கண்ட நேர்வுகள் அனைத்திலும் மின்புலத்தின் அலைவுநேரம் 'T', எலெக்ட்ரானின் தளர்நேரத்தைவிடக் குறைவாய் இருக்கும். அஃது எலெக்ட்ரானின் தளர்நேரத்திற்குச் சமமாய் இருக்கும்போது தளர்உட்கவருதல் (relaxation absorption) ஏற்படுகிறது. அந்நிலையில் ஆற்றல் உட்கவரப்படுகிறது. அதனால், உலோகத்தின்மீது படும் ஒளியின் ஆற்றலுக்கும், பிரதிபலித்த ஒளியின் ஆற்றலுக்கும் சிறிது வித்தியாசம் தோன்றுகிறது. மேலும், பல வழிகளில் மின்காந்த அலைகளின் ஆற்றல் உட்கவரப்படுகிறது. மேலும், $\omega\tau << 1$ என இருக்கும்போது, செயலுறு மின்கடத்துந்திறன் (effective electrical conductivity),

$$\sigma_{\text{செயல்}} \approx \frac{\delta}{\lambda}\,\sigma_0 \tag{6.26}$$

இங்கு 'δ' என்பது மேல்ஆழம் ; 'λ' என்பது எலெக்ட்ரானின் மோதலிடைத்தூரம். இந்நேர்வு வானொலி அதிர்வெண்களில் ஏற்படுகிறது. இத்தகைய நிலையில் வானொலி அதிர்வெண்ணுடைய மின்புலத்தால் மேல்ஆழ மதிப்பினைவிடக் குறைவாய் மோதலிடைத்தூரம் கொண்ட எலெக்ட்ரான்கள் மட்டும் முடுக்கப்படுகின்றன. இவ்வாறு முடுக்கப்படும் எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை δ/λ என்னும் அளவில் உள்ளது. ஆனால், பொதுவாய் $\lambda >> \delta$. அதனால், எலெக்ட்ரான்கள் வானொலி அதிர்வெண்ணுடைய மின்புலத்தில் இருக்கும்போது மின்கடத்துந்திறன் மதிப்பு குறைகிறது.



படம் **6.8** மாறுதிசை மின்புலத்தின் அதிர்வெண்ணிற்கு ஏற்ப மின்கடத்துந்திறன் மாறுதல்.

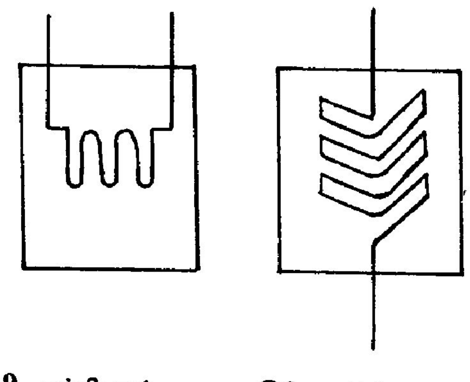
படம் 6.8 இல் காட்டியுள்ளபடி மிகக் குறைந்த அதிர்வெண்களில் மின்கடத்துந்திறன் நிலை மின்புலத்திலுள்ள மின்கடத்துந்திறனுக்குச் சமமாயுள்ளது. இந்நிலையில் உலோகம், ஒரு மெய் மின்கடத்தியாய்ச் செயலாற்றுகிறது. அதேசமயம் $\tau\omega \approx 1$ என மாறும்போது,

$$\sigma = \sigma_o /2 \tag{6.27}$$

என்று மாறும். தளர்நேரம் வழக்கமாய் 10^{-14} செகண்டுகள் இருக்கும். அதனால், $\tau\omega = 1$ என இருக்கும்போது $\omega = 10^{14}$ ஹெர்ட்சுகள் ஆகும். அதனால், இந்த அளவு உயர்ந்த அதிர்வெண்களில் $\sigma = \frac{\sigma_o}{2}$. அஃதாவது, புறஊதா ஒளி அதிர்வெண் நெடுக்கத்தில் உள்ள அதிர்வெண்களில் மின்கடத்துந்திறன் விரைந்து தாழும். இதற்கும் மிகுதியான உயர்அதிர்வெண்களில் மின்கடத்துந்திறன் விரைவாகக் குறைந்து சுழியை எட்டும். இக்குறைவிற்குக் காரணங்கள் பல உள. குறிப்பாய் இவ்வளவு உயர்ந்த அதிர்வெண்களில் எலெக்ட்ரான்கள் விரைந்து இயங்கமுடியாது செயலிழந்து போவதும், அதனால் நகர்வு திசைவேகத்தின் தொகுபயன் சுழியாய் மாறுவதும் முக்கியக்காரணங்களாகும். அஃதாவது, மிகஉயர்ந்த அதிர்வெண்களில் எலெக்ட்ரான்களுக்கு மின்புலத்தால் முடுக்கம் கிடைக்காததால் அவற்றின் நகர்வு திசைவேகம் சுழியாகிறது. அதனால், மின்கடத்துந்திறன் மதிப்பும் சுழியை எட்டுகிறது.

6.9 திரிபளவி

ஒருபொருளின் ஒருபுள்ளியில் காணும் தகைவை அளக்கத் திரிபளவியை (strain gauge)ப் பயன்படுத்துகிறோம். பொதுவாய்த் தகைவு, பொருளில் ஏற்படும் திரிபின்மூலம் அளக்கப்படுகிறது. மூன்றுவகையான திரிபளவிகள் உள. எந்திர திரிபளவி, ஒளி திரிபளவி, மின் திரிபளவி ஆகியன ஆகும். மேலும், ஒவ்வொருவகை திரிபளவியிலும் பிணைக்கப்பட்ட (bonded) திரிபளவி, பிணைப்பில்லா (unbonded) திரிபளவி என்றும் இரு உள்வகைகள் உள்ளன. பிணைக்கப்பட்ட திரிபளவியில் படம் 6.9 இல் காட்டியவாறு வளைக்கப்பட்ட மெல்லிய கம்பி ஒருமெல்லிய காகிதத் தகட்டின்மேல் பதிக்கப்பெற்றுள்ளது.



படம் 6.9 கம்பியால் ஆன திரிபளவியின் இயலமைப்புகள்

ஆனால், பிணைப்பில்லாத் திரிபளவியில் ஒருமின்தடைக்கம்பி தகைவைக் காணவேண்டிய பொருளைச் சுற்றிச் சுற்றப்பட்டிருக்கும். நடைமுறையில் உள்ள திரிபளவிகளில் பெரும்பான்மையானவை மின் வகைகளாகும்; அவை பற்றி மட்டும் இங்குக் காண்போம்.

திரிபளவியின் உணர்திறனைத் தீர்மானிக்கும் கணியமான, அளவி கணியம் (guage factor) 'F' ஐப் பின்வருமாறு வரையறுக்கலாம் :

$$F = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \qquad (6.28)$$

இங்கு R, L ஆகியவை முறையே தொடக்க மின்தடை, தொடக்க நீளம் ஆகும். $\Delta R, \Delta L$ ஆகியவை முறையே மின்தடை, நீளம் ஆகியவற்றில் தகைவினால் ஏற்பட்ட மாற்றங்கள் ஆகும். அதனால் அளவிகணியம், குறிப்பிட்ட அளவு திரிபிற்கு மின்தடை எவ்வளவு மாறியுள்ளது என்பதைத் தீர்மானிக்கிறது.

ஓர் இலக்கணம் வாய்ந்த திரிபளவியில் பின்வரும் சிறப்பியல்புகளைக் காணலாம். பகுப்பு (resolution) மிகுதியாய் இருக்கவேண்டி, அளவி கணியத்தின் மதிப்பு மிக அதிகமாயிருக்கும். திரிபளவியின் கம்பிகள் அதிக மின்தடையைக் கொண்டிருக்கும் ; மேலும், கம்பிகளின் வெப்பமின்தடைக்குணகம் மிகக்குறைவாயிருக்கும். கம்பிகளில் ஏற்படும் திரிபும், அதனால் ஏற்படும் மின்தடைமாற்றமும் நேர்விகிதத்தில் இருக்கும். திரிபு சுழியானால் கம்பிகளில் தொடக்க மின்தடை நிலைத்திருக்கும். அஃதாவது, கம்பிகளில் தேக்க விளைவு (hysteresis) ஏதும் நிகழாது.

திரிபிற்கும் மின்எதிர்ப்புத்திறனுக்கும் உள்ள தொடர்பு :

$$F = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \text{ என்பது தெரிந்ததே.}$$

$$\text{மேலும் மின்தடை, } R = \frac{\rho L^2}{V} \qquad (6.29)$$

இதில் 'ρ' என்பது மின்எதிர்ப்புத்திறன் ; 'V' என்பது பருமன், 'L' என்பது மின் கம்பியின் நீளம்.

$$\text{பிரிஜ்மேன் மாறிலி, } C = \frac{d\rho/\rho}{dV/V} \qquad (6.30)$$

$$\text{மற்றும் பாய்சான் விகிதம், } \mu = \frac{-dD/D}{dL/L} = \frac{\text{பக்கவாட்டுத்திரிபு}}{\text{அச்சுத்திரிபு}} \qquad (6.31)$$

இங்கு D என்பது திரிபளவியிலுள்ள கம்பியின் விட்டமாகும். சமன்பாடு (6.29) இல்

இருபக்கமும் மடக்கை (logarithm) எடுத்து வகையீடுசெய்ய (differentiation) நமக்குக் கிடைப்பது

$$\frac{dR}{R}=\frac{d\rho}{\rho}+\frac{2dL}{L}-\frac{dV}{V} \quad (\text{அல்லது}) \quad \frac{dR}{R}=\frac{2\,dL}{L}+\frac{dV}{V}\left[\frac{d\rho/\rho}{dV/V}-1\right]$$

சமன்பாடு (6.30) ஐ பயன்படுத்த,

$$\frac{dR}{R}=\frac{2\,dL}{L}+\frac{dV}{V}[\,C-1\,] \tag{6.32}$$

மேலும், கம்பியின் கன அளவு $V=\frac{\pi}{4}D^2 L$

இதன் இருபக்கமும் மடக்கை எடுத்து வகையீடுசெய்ய,

$$dV/V=2\,dD/D+\frac{dL}{L}$$

$\frac{dV}{V}$ யின் மதிப்பினைச் சமன்பாடு (6.32) இல் இட,

$$\frac{dR}{R}=\frac{2\,dL}{L}+\left[\frac{2\,dD}{D}+\frac{dL}{L}\right](C-1)$$

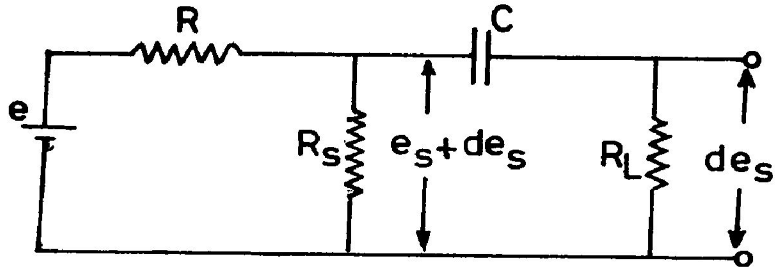
$$\therefore\ F=\frac{dR/R}{dL/L}=2+(C-1)\left[\frac{2dD/D}{dL/L}+\frac{dL/L}{dL/L}\right]$$

(அல்லது)

$$\boxed{\mathbf{F=2+(C-1)\,[1-2\mu]}} \tag{6.33}$$

பெரும்பாலும் திரிபளவியில் பயன்படும் நைக்ரோம் (நிக்கல் 80% + குரோமியம் 20%) கம்பியின் வெப்பமின்தடைக்குணகம் = 1 ; அதன் மின்எதிர்ப்புத்திறன் = 10^{-6} ஓம்-மீட்டர். மேலும், இக்கம்பியை வெப்பநிலை 1200°C வரை பயன்படுத்தலாம். நைக்ரோம் கம்பியின் பிரிஜ்மேன் மாறிலி, பாய்சான் விகிதம் ஆகியவற்றின் மதிப்புகள் முறையே 1.13, 0.3 ஆகும். அதனால், நைக்ரோம் கம்பியின் அளவிகணியம் $F=2.5$. குறைகடத்தியால் ஆன திரிபளவிக் கம்பிகளில் அளவிகணியமதிப்பு மூன்றனைவிட அதிகமாயிருப்பதால், அவற்றின் உணர்திறன் (sensitivity) அதிகமாயிருக்கும். ஆனால், குறைகடத்தியின் மின்தடை வெப்பநிலைக்கேற்ப மாறுபடும் தன்மையுடையது.

அதிரும் பொருளின் மீதுள்ள தகைவை அளத்தல் :



படம் 6.10 பொருளின் மீது இயக்கநிலையில் உள்ள பளு இருக்கும் போது தகைவை அளக்கப் பயன்படும் மின்சுற்று.

படம் 6.10 இல் R_s என்பது திரிபளிவியாகும். அதனை அதிரும் பொருளில் தகைவினால் ஏற்படும் மாற்றங்களைக் காண விழையும் இடத்தில் நன்கு பொருத்த வேண்டும். பொருளின்மீது இயக்கநிலையில் உள்ள பளு (dynamic load) இருப்பதால் திரிபளவியில் சிறு அதிர்வுகள் ஏற்படும். அதனால், திரிபளவியில் ஒருமாறுதிசை மின்னழுத்தம் தோன்றுகிறது. அதன் அதிர்வெண்ணும் எந்திர அதிர்வுகளின் அதிர்வெண்ணும் சமம். மின்தேக்கி 'C' யின் மூலம் இம்மாறுதிசை மின்னழுத்தம் மின்சுற்றிலுள்ள நிலை மின்னழுத்தத்திலிருந்து தனியே பிரித்து எடுக்கப்படுகிறது. சிறுஅதிர்வுகளுக்கு, பளுமின்தடை (load resistance), மின்தேக்கி ஆகியவற்றின் நேர மாறிலி (time constant) மிகுதியாய் இருக்கவேண்டும். அதனால், ஏறத்தாழ '1' ஹெர்ட்ஸ் அதிர்வெண்ணுடைய அதிர்வுகளுக்கு மின்தேக்கியின் மின்தேக்குந்திறன் ஒருமைக்ரோபாரடும், பளு மின்தடைமதிப்பு பத்து மெகாஓம்களாய் இருக்க வேண்டும்.

திரிபளவி R_s இல் மின்னழுத்தம் 'e' ஆல் ஏற்படும் மின்னழுத்த வேறுபாடு,

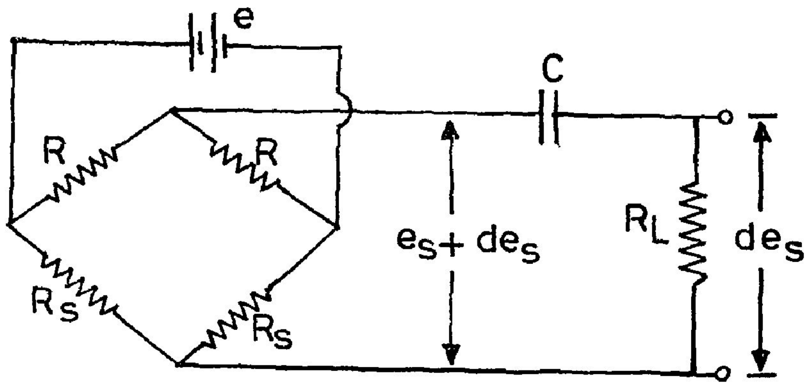
$$e_S = \frac{e R_S}{R_S + R} = \frac{e}{1 + R/R_s}$$

இதிலிருந்து தகைவினால் ஏற்படும் மாறுதிசை மின்னழுத்தத்தைக் காண மேற்கண்ட சமன்பாட்டை வகையீடுசெய்ய வேண்டும்.

$$de_s = \frac{e}{\left(1 + \frac{R}{R_s}\right)^2} \frac{R}{R_s^2} dR_s = \frac{e\,R\,dR_s}{(R + R_s)^2} \qquad (6.34)$$

அஃதாவது, $de_s \propto dR_s$

எனவே, பளுமின்தடை R_L இல் காணும் மாறுதிசை மின்னழுத்தம் de_s பொருளில் உள்ள தகைவிற்கு நேர்விகிதத்தில் இருக்கும். அதிகநேர அளவீடுகளுக்கும், வெப்பநிலை மாறுபாடுகளின்போதும் சமனச்சுற்று (bridge circuit)ப் பயன்படுகிறது.

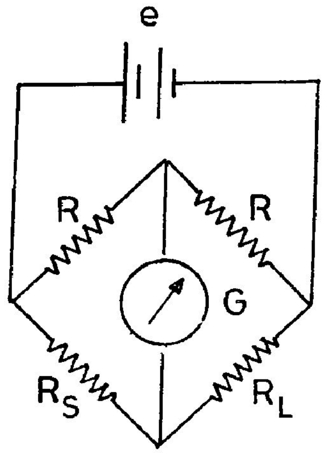


படம் **6.11** *வெப்பநிலை மாறுபாட்டிற்காகத் திருத்தப்பட்ட வீட்ஸ்டோன் சமனச்சுற்று.*

படம் 6.11 இல் காட்டியபடி சமனச்சுற்றில் நிலைத்தரமிக்க இரு சம மதிப்புள்ள மின்தடைகள் உள்ளன. அவை 'R' என்று குறியீடு செய்யப்பட்டுள்ளன. அதேபோல் இருசமமான திரிபளவிகளும் சமனச்சுற்றில் உள்ளன. ஒன்று செயலுடை திரிபளவியாகும்; மற்றொன்று வெப்பநிலை மாறுபாட்டால் ஏற்படும் பிழைகளைக் களைய இணைக்கப்பட்டுள்ள திரிபளவியாகும். இவை R_s என்று சுற்றில் குறிக்கப்பட்டுள்ளன. வெப்பநிலை மாறுபாட்டிற்காக இணைக்கப்பட்ட திரிபளவியையும், செயலுடை திரிபளவியையும் அதிரும் பொருளின் வெவ்வேறு இடங்களில் பொருத்த வேண்டும். அஃதாவது, செயலுடை திரிபளவியைப் பொருளில் தகைவினால் ஏற்படும் மாற்றங்களைக் காணும் இடத்தில் நன்கு பொருத்த வேண்டும். ஆனால், வெப்ப நிலை மாறுபாட்டிற்காக இணைக்கப்படும் திரிபளவியைச் சோதனைக்குள்ளான இடத்தில் காணும் திரிபிற்கு எதிரான திரிபுடைய இடத்தில் நன்கு பொருத்த வேண்டும். இங்ஙனம் பொருத்துவதால் வெப்பநிலை வேறுபாடுகளால் நம் அளவீடுகளில் பிழைகள் ஏதும் ஏற்படாது. சமனச்சுற்றில் சமமாய் ஆகாத மின்னழுத்தம் மின்தேக்கி வழியாய்ச் செல்லும்போது அதிலுள்ள நிலைமின்னழுத்தம் தனியாய்ப் பிரிக்கப்பட்டு, மாறுதிசை மின்னழுத்தம்மட்டும் பளுமின்தடையில் தோன்றும். அதனை அளப்பதனால் பொருளில் உள்ள தகைவினைக் கண்டுபிடிக்கலாம்.

நிலைஅளவீடு (static measurement) :

மேற்கண்ட முறைகள் பொருள் அதிரும்போது அதிலுள்ள தகைவினைக் கண்டுபிடிக்க உதவிசெய்வனவாகும். ஆனால், ஒரு பொருளில் நிலையான தகைவு இருக்குமானால் அதனைச் சாதாரண வீட்ஸ்டோன் சமனச்சுற்றுமூலம் கண்டுபிடிக்கலாம். சமனச்சுற்றுச் சமமாகாத நிலையில் அதில் இணைக்கப்பட்ட மின்னோட்டங்காட்டி (galvanometer) வழியே செல்லும் மின்னோட்டம் பொருளின்கண் உள்ள தகைவிற்கு நேர்விகிதத்தில் இருக்கும்.



படம் 6.12 திரிபளவி இணைக்கப்பட்ட வீட்ஸ்டோன் சமனச்சுற்று

மின்னோட்டங்காட்டியில் உள்ள குறிமுள் விலகும்தூரம் தகைவாய் அளவிடப்பட்டுக் குறியீடு செய்யப்பட்டிருந்தால் நேரிடையாய்த் தகைவை அளக்கலாம். திரிபளவியைத் தகைவுடைய பொருளில் இணைப்பதற்கு முன்னால் மின்னோட்டங்காட்டியில் மின்னோட்டம் ஏதும் செல்லாதவாறு சமனச்சுற்றைச் சமப்படுத்த வேண்டும்.

6.10 வீட்மன் – ஃபிரான்ஸ் விதி (Wiedemann-Franz law)

ஓர் உலோகத்தின் வெப்பங் கடத்துந்திறனுக்கும் மின்கடத்துந்திறனுக்கும் உள்ள விகிதத்தின் மதிப்பு, உலோகத்தின் வெப்பநிலைக்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது. இதுவே வீட்மன்–ஃபிரான்ஸ் விதியாகும்.

அஃதாவது, $$\frac{K}{\sigma} \alpha T$$

(அல்லது) $$\frac{K}{\sigma} = LT \qquad (6.35)$$

இதில் 'L' என்பது ஒருமாறிலி அல்லது லாரென்ஸ் எண் ஆகும். சோதனைமூலம் பல உலோகங்களுக்கு அதன் மதிப்புச் சராசரியாய் 2.31×10^{-8}வாட்டு–ஓம்/ கெல்வின்^{2} என்னும் மதிப்பில் இருக்கிறது. மிகப்பழைய கொள்கையைப் பயன்படுத்தி வீட்மன்–ஃபிரான்ஸ் விதியைத் தருவிக்கலாம். மிகப்பழைய கொள்கையின்படி, உலோகத்தின் மின்கடத்துந்திறன்

$$\sigma = \frac{ne^2 \tau}{m} \qquad (6.8)$$

மிகப்பழைய கொள்கையின்படி, வெப்பங்கடத்துந்திறன்

$$K = \frac{1}{3} C_{V(\text{எலெக்ட்ரான்})} \bar{v} \lambda \qquad (5.53)$$

மேலும், எலெக்ட்ரானிய தன்வெப்ப ஏற்புத்திறன்

$$C_{V(\text{எலெக்ட்ரான்})} = \frac{3}{2}R = \frac{3}{2}nk\ ;$$

இதில் 'k' என்பது போல்ட்ஸ்மேன் மாறிலி ; 'n' என்பது ஒரு கிலோ மோலிலுள்ள கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை.

$$\therefore K = \frac{1}{2}nk\overline{v}^2\tau \tag{6.36}$$

$$\text{எனவே}\quad \frac{K}{\sigma} = \frac{\frac{1}{2}nk\overline{v}^2\tau}{\frac{ne^2\tau}{m}} = \frac{mk\overline{v}^2}{2e^2}$$

$$\text{ஆனால்,}\quad \frac{1}{2}m\overline{v}^2 = \frac{3}{2}kT$$

$$\boxed{\therefore \frac{K}{\sigma} = \frac{3}{2}\left(\frac{k}{e}\right)^2 T} \tag{6.37}$$

$$\text{அல்லது}\qquad \frac{K}{\sigma T} = L,\ \text{ஒரு மாறிலி}$$

மிகப்பழைய கொள்கையின்படி 'L' இன் மதிப்பு நடைமுறை மதிப்பில் ஏறத்தாழப் பாதிதான் உள்ளது. ஆனால், கவளக் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான் கொள்கையைப் பயன்படுத்தி லாரென்ஸ் எண் 'L' இன் மதிப்பு நடைமுறை மதிப்போடு பொருந்துமாறு கண்டுபிடிக்கலாம். அக் கொள்கையின்படி ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டத்திற்கு அருகில் உள்ள எலெக்ட்ரான்களே வெப்பங்கடத்தலிலும், மின்கடத்தலிலும் முக்கியப் பங்கு வகிக்கின்றன. அதனால், வெப்பங் கடத்துந்திறன்,

$$K = \frac{\pi^2}{3}\frac{nk^2}{m}\tau_f T \tag{5.56}$$

இதில் τ_f என்பது ஃபெர்மி எலெக்ட்ரான்களின் தளர்நேரமாகும். மேலும், அக்கொள்கையின்படி மின்கடத்துந்திறன்,

$$\sigma = \frac{ne^2\tau_f}{m}$$

$$\therefore \frac{K}{\sigma T} = \frac{\pi^2}{3}\left(\frac{k}{e}\right)^2 = L \tag{6.38}$$

இதன் மதிப்பு 293 கெல்வினில் 2.44×10^{-8} வாட்டு- ஓம்/கெல்வின்^{2} என வரும். அதனால், இது நடைமுறை மதிப்போடு ஒத்த மதிப்பாய் விளங்குகிறது.

$\frac{K}{\sigma T}$ யின் மதிப்பு எல்லா உலோகங்களுக்கும், எல்லா வெப்பநிலைகளிலும் (வெப்பங் கடத்தலில் மிகப் பெருமளவு கடத்து எலெக்ட்ரான்களால் நிகழ்ந்தால் மட்டிலும்) ஒருபொதுமாறிலியாய் இருக்கவேண்டும். இதுவே வீட்மன் – ஃபிரான்ஸ் விதியாகும்.

6.11 வெப்பமின் பொருள்கள் (thermoelectric materials)

வெப்பமின்னிரட்டை (thermocouple) உருவாக்க வெப்பமின்பொருள்கள் பயன்படுகின்றன. ஒரு வெப்பமின்னிரட்டையின் வெவ்வேறான இரண்டு உலோகக் கம்பிகளின் முனைகள் சேரும் சந்திகளை வெவ்வேறான வெப்பநிலைகளில் வைத்தால் அக் கம்பிகளின் சுற்றில் ஒரு மின்னியக்கு விசை (electromotive force) தோன்றுகிறது. வெப்பநிலை வேறுபாடு மிகுதியாய் இருக்கும்போது, தோன்றும் மின்னியக்குவிசையின் மதிப்பும் மிகுதியாய் இருக்கும். அதனால், வெப்ப மின்னிரட்டைகளைத் தொடர்இணைப்பில் இணைக்க, அந்த அமைப்பு ஒருமின்னியற்றியாய் (generator)ச் செயல்படும். இன்று வெப்பமின்னிரட்டைகள் மின்னியற்றிகளாய்ச் செயல்படுவதுடன், வெப்பநிலை அளவீடுகளிலும், வெப்பப்படுத்தவும், குளிர்படுத்தவும் பயன்படுகின்றன. ஒருநல்ல வெப்பமின்னிரட்டை மிகுதியான மின்னியக்கு விசையைத் தோற்றுவிக்க அதன் சிறப்புக் குறியெண் (figure of merit) ‘Z’ மிகுதியாய் இருக்க வேண்டும். சிறப்புக் குறியெண்ணைப் பின்வருமாறு வரையறுக்கலாம்.

$$Z = \frac{S^2 \sigma}{K}$$

எனில் S என்பது வெப்ப மின்திறன் (thermoelectric power) ஆகும். ஒரு கெல்வின் வெப்பநிலை உயர்விற்குத்தோன்றும் வெப்ப மின்னியக்குவிசையே வெப்ப மின்திறனாகும். ஒவ்வொரு உலோகத்திற்கும் இது மாறிலியாயுள்ளது. மேலும், வீட்மன்-ஃபிரான்ஸ் விதிப்படி உலோகங்களில்,

$$\frac{K}{\sigma T} = L, \text{ ஒரு மாறிலி.}$$

ஒவ்வொரு உலோகத்திற்கும் ஒருகுறிப்பிட்ட வெப்பநிலையில், K/σ ஒரு மாறிலியாயிருக்கும். அதனால், உலோக வெப்ப மின்னிரட்டைகளில் சிறப்புக்குறியெண் ‘Z’ ஐ அதிகப்படுத்துவதற்குரிய வழிமுறைகள் ஏதும் இல்லை. சிறப்புக் குறியெண் மதிப்பு உலோகங்களில் ஒருமாறிலியாயும், மிகக் குறைவாயும் உள்ளது. அதேபோல் குறைகடத்திகளான ஜெர்மேனியத்திற்கும், சிலிக்கானுக்கும் வெப்பங்கடத்தும் திறன் மிக அதிகமாயுள்ளதால் அவை வெப்பமின் இயற்றிகளை உருவாக்கப் பயன்படா. ஆனால், கலவை நிலையில் உள்ள சில குறைகடத்திகளில் உலோகத்தைவிட அதிகமான வெப்பமின் விளைவு (thermoelectric effect) உள்ளது. அஃதாவது, பிஸ்மத் டெலுரைடு அல்லது பிஸ்மத் செலினைடு, ஆண்டிமனி டெலுரைடு ஆகியவற்றில் ‘Z’ இன் மதிப்பு மிக அதிகமான அளவில் உள்ளது. குறிப்பாய் 75 விழுக்காடுகள் பிஸ்மத் டெலுரைடும், 25 விழுக்காடுகள் பிஸ்மத் செலினைடும் ($75\% \, Bi_2Te_3 + 25\% \, Bi_2Se_3$) கலந்த குறைகடத்திக் கலவையிலும்,

50 விழுக்காடுகள் பிஸ்மத் டெலுரைடும், 50 விழுக்காடுகள் ஆண்டிமணி டெலுரைடும் (50% Bi_2Te_3 + 50% Sb_2Te_3) கலந்த குறைகடத்திக் கலவையிலும் அதிகமான மின்கடத்துந்திறனும் அதேசமயம் குறைவான வெப்பங்கடத்தும் திறனும் இருப்பதால் சிறப்புக்குறியெண் 'Z' இன் மதிப்பு மிக அதிகமாயுள்ளது. அதேபோல் காரீய டெலுரைடு குறைகடத்தியில் (இதில் காரீயம் 'N' வகை மாசு அணுவாகவும், டெலுரியம் 'P' வகை மாசு அணுவாகவும் உள்ளன) 61.9 விழுக்காடுகள் காரீயமும், 38.1 விழுக்காடுகள் டெலுரியமும் கலக்கும்போது அது நல்லதொரு வெப்பமின் விளைவை ஏற்படுத்தும் பொருளாய் மாறுகிறது. பெரும வெப்பமின் செயல்திறன் (thermoelectric efficiency) 10 விழுக்காடுகளாய் இருந்திடினும் பல வெப்ப மின்னிரட்டைகளைத் தொடர்ச்சியாய்த் தொடர்இணைப்பில் இணைக்க நமக்கு அதிகமான வெப்பமின்னியக்கு விசை கிடைக்க வழியுண்டு.

6.12 தொழிற்துறையில் பயன்படும் சில முக்கியக் கடத்திகளும், மின்தடைகளும்

மின்செலுத்துகை வழிகளிலும் (electrical transmission lines), மின் அளிப்பு வழிகளிலும் (electrical distribution lines) மின் ஆற்றல் இழப்பு 'I^2R' மிகக் குறைவாயிருக்கவேண்டும். மேலும், இவற்றிற்குப் பயன்படும் கடத்திகளின் விலை மிகக்குறைவாயும், கம்பிகளாயிழுப்பதற்கு இசைவு கொடுப்பதாயும், நல்ல எந்திரவலு உள்ளதாயும் இருக்கவேண்டும். இத்தகைய நோக்கங்களோடு கடத்திகளைத் தேர்ந்தெடுத்தால் நமக்குக் கிடைப்பது தாமிரமும், அலுமினியமும் ஆகும். ஆனால், இன்று தாமிரவிலை மிகுதியாயுள்ளதால் அலுமினியமே பெருமளவில் பயன்படுத்தப்பட்டுவருகிறது. மிகுதியான குறுக்குப் பரப்புடைய அலுமினிய வடங்களில் (cables) I^2R இழப்புக்குறைவாயிருக்கும். அலுமினியத்தோடு எஃகு சிறிது சேர்த்து உறுதிப்படுத்தப்பட்டு அலுமினியத்தின் மீட்சிகுணகம் (elastic modulus) மிகுதியாக்கப்படுகிறது. இவ்வகை அலுமினிய வடங்களை "ஏசிஎஸ்ஆர் (ACSR : Aluminium Conductor Steel Reinforced) வடங்கள்" என அழைக்கிறார்கள். இவ்வகை வடங்கள்மூலம் மின்செலுத்துகை வழியில் உள்ள ஒவ்வொரு மின்கம்பத்திற்கும் இடையே உள்ள தூரத்தை அதிகப்படுத்தலாம். தாமிரம் மின் அளிப்பு வழிகளில் பயன்படுகிறது. மேலும், ஆக்ஸிஜன் இல்லா அதிக மின்கடத்துந்திறன் உள்ள தாமிரமே பெரிதும் பயன்படுகிறது. இதனை ஓ.எப்.ஹெச்.சி. (OFHC : Oxygen Free High Conductivity) தாமிரம் என்று கூறுகிறார்கள். இவ்வகை தாமிரத்தில் ஆற்றல் இழப்பும், அரிமானமும் குறைவாய் உள்ளன.

தொடுபொருள்களுக்கு (contact materials) அதிக உருகுநிலை உடையதும், அதிக மின்கடத்துந்திறன் உடையதுமான பொருள்கள் விரும்பப்படுகின்றன. மேலும், அவை ஆக்ஸிஜனேற்றலுக்கு (oxidation) மிகுந்த தடையை அளிக்க வல்லனவாயிருக்கவேண்டும். தாமிர, வெள்ளி, தங்க உலோகக் கலவைகள் தொடுபொருள்களாய்ப் பயன்படுகின்றன.

நிலைத்தரம் மிக்க மின்தடைகளுக்கு வெப்ப மின்தடைக் குணகம் புறக்கணிக்கத் தக்க அளவு இருக்கவேண்டும். மேலும், இவை துருப் பிடிக்காத தன்மை யுடையனவாயிருக்கவேண்டும். மாங்கனின் (87% தாமிரம் + 13% மங்கனீசு) உலோகக்

கலவைக்கு வெப்பமின் தடைக்குணகம் 2×10^{-5} /கெல்வின் ஆகும். அதேசமயம் தூய தாமிரத்திற்கு அதன் மதிப்பு 4×10^{-3} /கெல்வின் ஆகும். அதனால், உலோகக் கலவைகளே மின் தடைகள் செய்ய மிகப் பயன்படுகின்றன. மேலும், கான்ஸ்டன்டன் (constantan) உலோகக் கலவைக்கு (60% தாமிரம் + 40% நிக்கல்) மிகக் குறைந்த வெப்பமின் தடைக்குணகமும், துருப்பிடிக்காத் தன்மை நிறைந்தும் இருப்பதால் அது தரமிக்க மின் தடைகள் செய்யப்பயன்படுகிறது. மின்உலைகளை வெப்பப்படுத்தப் பயன்படும் மின் கம்பிகளாய் நைக்ரோமும் (80% நிக்கல் + 20% குரோமியம்), காந்தலும் (69% இரும்பு + 23% குரோமியம் + 6% அலுமினியம் + 2% கோபால்ட்) பயன்படுகின்றன. சாதாரண மின்விளக்குகளில் பயன்படும் மின்னிழைகள் (filaments) அதிக உருகுநிலை உடைய (3410°C) டங்க்ஸ்டன் மூலம் செய்யப்படுகின்றன. அது வெள்ளொளியில் (1500°C) தொய்வுபடாமல் இருக்கத் தோரியா (ThO_2) வைச் சிறிது இதனுடன் சேர்த்துப்பிரிகை கடினப்படுத்துதல் (dispersion hardening) மூலம் தொய்விற்குரிய தடை (creep resistance) அதிகப்படுத்தப்படுகிறது. மின்தடை வெப்பமானிகளில் (electrical resistance thermometers) பயன்படும் இழைகள் அதிக வெப்ப மின்தடை குணகம் உடையதாயிருக்கவேண்டும். மேலும், அது சுத்தமான உலோகத்தில் செய்யப்பட்டதாயும் இருக்க வேண்டும். இதற்குப் பிளாட்டினம் மிகுதியாய்ப் பயன்படுகிறது.

6.13 உலோகப் புறப்பரப்பில் ஏற்படும் சில விளைவுகள்

(அ) வெப்ப அயனி உமிழ்வு :

ஒருகடத்தியை வெப்பப்படுத்தும்போது அதிலுள்ள கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களின் இயக்க ஆற்றல் உயர்கிறது. உயர் வெப்பநிலைகளில் அவை கடத்தியின் தளத்தில் உள்ள ஈர்ப்பு விசையை விஞ்சிக் கடத்தியைவிட்டே வெளியேறுகின்றன. வெளியேறும் எலெக்ட்ரான்கள் கடத்தியைச் சூழ்ந்திருக்கும். இங்ஙனம் வெப்பத்தால் கடத்தியிலிருந்து எலெக்ட்ரான்கள் உமிழப்படுவதால் இந்நிகழ்ச்சியை வெப்ப அயனி உமிழ்வு என்பர். ஓர்எலெக்ட்ரான் கடத்தியைவிட்டு நீக்குவதற்குத்தேவையானசிறுமஆற்றலை **வெளியேற்று ஆற்றல்** (work function) என்கிறோம். ஒவ்வொரு கடத்திக்கும் வெளியேற்று ஆற்றல் வெவ்வேறு மதிப்புடையதாயிருக்கும். பொதுவாய் வெளியேற்று ஆற்றல் கடத்தியினுடைய அணிக்கோவையின் அணு இடைத்தூரத்தையும், அதன் புறப்பரப்புத் தளத்தின் நிலையையும், படிகத்தன்மையையும் சார்ந்துள்ளது. மேலும், அது கடத்தியினுள் செலுத்தப்படும் மின்புலத்தையும், கடத்தியின் வெப்பநிலையையும் சார்ந்துள்ளது. வெப்ப அயனி மின்னோட்டச் செறிவைப் பின்வருமாறு எழுதலாம்.

$$J = AT^2\, e^{-\varphi/kT} \qquad (6.39)$$

இதனை ரிச்சர்டுசன்-துஷ்மன் (Richardson- Dushman) சமன்பாடு என்பர். இதில்

$A = 4\pi\, me\, k^2/h^3$; மேலும், 'A' ஒரு மாறிலியாகும். சமன்பாடு (6.39) இன் படி வெப்ப அயனி உமிழ்வினால் ஏற்படும் மின்னோட்ட அடர்த்தி, வெளியேற்று ஆற்றலின் (φ) அடுக்குக்குறிக்கு எதிர்விகிதத்திலும், வெப்பநிலையின் இருமடிக்கு நேர்விகிதத்திலும்

உள்ளது. அதனால், வெப்பநிலை உயரும்போது மின்னோட்ட அடர்த்தி கூடும். மேலும் வெளியேற்று ஆற்றல் குறையும்போதும் மின்னோட்ட அடர்த்தி கூடுகிறது. தோரிய – டங்ஸ்டன் மின்னிழை வெப்ப அயனி உமிழ்ப்பானாய் மிகவும் பயன்படுகிறது. மேலும், மிக உயர்ந்த வெப்பநிலையில் வெப்ப அயனி உமிழ்வு நடக்கத் தூய டங்ஸ்டன் பயன்படுகிறது. ஆக்ஸைடு பூசிய டங்ஸ்டன் மிகக்குறைந்த வெப்பநிலையில் வெப்ப அயனி உமிழ்வு நடக்கப்பயன்படுகிறது. தூய டங்ஸ்டனுக்கும் தோரிய டங்ஸ்டனுக்கும் வெளியேற்று ஆற்றல் முறையே 4.5, 2.7 எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு ஆகும்.

(ஆ) புல உமிழ்வும், ஷாட்டி விளைவும் (Field emission and Schottky effect) :

ஓர் உலோகத்தளத்திலிருந்து மின்புலத்தால் எலெக்ட்ரான்கள் உமிழப்படுவதைப் புல உமிழ்வு என்கிறோம். இஃது ஒளிப்பொறி மின்னிறக்கத்திலும் (electrical discharge), புல உமிழ்வு நுண்ணோக்கியிலும் (field emission microscope) மிகமுக்கிய பங்கு வகிக்கிறது. மின்புலச் செறிவின் மதிப்பு அதிகமாகும்போது சீரிடை மின்னழுத்தத் தடுப்பின் (potential barrier) அகலம் குறைந்து அது செவ்வக வடிவத்தடுப்பிலிருந்து முக்கோணவடிவத் தடுப்பாய் மாறுகிறது. அதனால் புழல் விளைவு (Tunnel effect) ஏற்பட வசதி கிடைக்கிறது. மேலும், ஓர்எலெக்ட்ரான் உலோகத் தளத்திலிருந்து வெளியேறுதற்குரிய நிகழ்தகவு மின்னழுத்தத் தடுப்பு அகலத்தின் அடுக்குக்குறிச் சார்பில் அமைகிறது. அஃதாவது, மின்னழுத்தத் தடுப்பின் அகலம் சிறிது குறைந்தாலும் உலோகத்திலிருந்து எலெக்ட்ரான் வெளியேறுதற்குரிய நிகழ்தகவு மிக அதிகமாகிறது. மேலும், மின்னழுத்தத் தடுப்பின் அகலம் செலுத்தப்படும் மின்புலச் செறிவிற்கு எதிர் விகிதத்தில் உள்ளது. அதனால், அதிக மின்புலச் செறிவில் உலோகத்தின் புறப்பரப்பில் உள்ள எலெக்ட்ரான்கள் உமிழப்படுகின்றன.

ஷாட்டி விளைவின் மூலமும் உலோகத்திலிருந்து எலெக்ட்ரான்கள் உமிழப்படுகின்றன. புலஉமிழ்வில் வெளியேற்று ஆற்றலை மாற்றாமல் புழல்விளைவிற்குரிய நிகழ்தகவைக் கூட்டி, எலெக்ட்ரான்கள் உமிழப்படுகின்றன. எனினும், உலோகத் தளத்திற்கு அருகில் மின்புலச் செறிவும் இருந்து, அத்தளம் வெப்பமாயும் இருந்தால், வெளியேற்று ஆற்றலின் மதிப்புக் குறைகிறது. அதனால், ஷாட்டி விளைவு வெப்ப அயனி உமிழ்வின் சிறப்பு நேர்வு ஆகும். குறிப்பிட்ட வெப்பநிலையில் உலோகத் தளத்திலிருந்து உமிழப்படும் எலெக்ட்ரான்களால் ஏற்படும் மின்னோட்டம் செலுத்தப்படும் மின்புலச் செறிவினுடைய வர்க்கமூலத்தின் அடுக்குக் குறிச்சார்பில் அமைகிறது. அஃதாவது, மின்புலச் செறிவு சிறிது கூடினாலும் மின்னோட்டம் அடுக்குக் குறிச் சார்பில் உயருகிறது. அதனால் $\log I$ க்கும் $\sqrt{V}$ க்கும் இடையே ஒரு வரைபடம் வரைந்தால் அது நேர்கோடாயிருக்கும். இதில் 'V' என்பது செலுத்தப்படும் மின்னழுத்தமாகும்.

(இ) ஒளிமின் விளைவு (photoelectric effect) :

ஓர்உலோக அல்லது குறைகடத்திப் புறப்பரப்பின்மீது ஒளி அல்லது மற்றைய கதிர்வீச்சுப்படும்போது, உலோக அல்லது குறைகடத்திப் புறப்பரப்பிலிருந்து எலெக்ட்ரான்கள் உமிழப்படுதற்கு ஒளிமின் உமிழ்வு (photoelectric emission) என்பர்.

ஒளிமின் உமிழ்விற்கெனச் சில விதிகள் உள்ளன.

1. ஒளிமின்விளைவால் ஏற்படும் மின்னோட்டம், படுஒளிக்கதிரின் செறிவிற்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது.

2. ஒவ்வொரு உலோகப் புறப்பரப்பிற்கும் ஒருகுறிப்பிட்ட சிறும அதிர்வெண்ணான **பயன்தொடக்க அதிர்வெண்** (threshold frequency) உடைய கதிர்வீச்சிலிருந்து எலெக்ட்ரான்கள் உமிழப்படுகின்றன. படுகதிர்வீச்சின் அதிர்வெண் அப்பயன் தொடக்க அதிர்வெண்ணைவிடக்குறைவாயிருந்தால் ஒளிமின்விளைவு ஏற்படாது.

3. ஒளி எலெக்ட்ரான்களின் (photo electrons) திசைவேகம் படுஒளியின் அதிர்வெண்ணைச் சார்ந்துள்ளதேயன்றிப் படுஒளியின் செறிவைச் சார்ந்ததில்லை.

4. ஒளி உலோகப் புறப்பரப்பில் பட்டவுடன், ஒளி எலெக்ட்ரான்கள் உமிழப் படுகின்றன. அஃதாவது ஒளிமின் விளைவு நேரம் தாழ்த்தாது நிகழ்வ தொன்றாகும்.

பௌலர் என்பவர் ஒளிமின் விளைவால் ஏற்படும் மின்னோட்டச் செறிவிற்குரிய சமன்பாட்டைத் தருவித்து உள்ளார். அதன்படி,

$$J = A\,T^2\,F\left(\frac{h\nu - \varphi_o}{kT}\right) \tag{6.40}$$

இதில் 'A' என்பது ஒரு மாறிலி. $F\left(\frac{h\nu - \varphi_o}{kT}\right)$ ஒருவரையிலாத்தொடர் (infinite series). இது பௌலரின் கோவை எனப்படுகிறது. இதன்மூலம் உலோகங்களின் ஒளிமின் வெளியேற்று ஆற்றலை (photoelectric workfunction)க் கண்டுபிடிக்கலாம். நடைமுறை ஒளிமின் வெளியேற்று ஆற்றல் மதிப்பிற்கும், பௌலரின் சமன்பாடுமூலம் கண்டுபிடிக்கப்பட்ட மதிப்பிற்கும் வித்தியாசம் ஏதும்இல்லை. மேலும், ஒளிமின் விளைவிற்குரியச் சமன்பாட்டைக் கவளக் கொள்கையின்மூலம் விளக்கி நோபல் பரிசைவென்ற ஐன்ஸ்டைனின் சமன்பாட்டைச் சிறிது பார்ப்போம்.

$$\boxed{h\nu = \varphi_o + \frac{1}{2}m\mathrm{v}^2} \tag{6.41}$$

இதில் $h\nu =$ படுஒளிக்கதிர் போட்டானின் ஆற்றல்.

$\varphi_o =$ ஒளிமின் வெளியேற்று ஆற்றல் $= h\boldsymbol{\nu}_0$

($\boldsymbol{\nu}_0 =$ என்பது ஒளிமின் விளைவு ஏற்படுதற்குரிய ஒளிக்கதிரின் பயன்தொடக்க அதிர்வெண்)

$\frac{1}{2}m\mathrm{v}^2 =$ ஒளி எலெக்ட்ரானின் இயக்க ஆற்றல்.

ஐன்ஸ்டைனின் ஒளிமின்விளைவிற்குரிய சமன்பாட்டை (6.41) வைத்து, ஒளிமின் விளைவு விதிகளைத் தருவிக்கலாம். கண்ணுறும் ஒளி, புறஊதா ஒளி, அகச்சிவப்பு ஒளி ஆகியவற்றால் இயங்கும் தன்மையுடையப் பலவகை ஒளிமின் கருவிகள் உள்ளன. ஒளிமின்கலம் (photoelectric cell), ஒளிக்குழாய் (photo tube) ஆகியன இவற்றுள் முக்கியமானவையாகும். ஒளி இதன்மேல் பட்டவுடன் உண்டாகும் மின்னோட்டத்தைப் பெருக்கி, அதனைக் கொண்டு கதவுகளைத் திறக்கவும், மூடவும், எச்சரிக்கைச் சாதனங்களை இயக்கவும், பல தானியங்கு சாதனங்கள் ஏற்படுத்தப்பட்டுள்ளன. ஒளிமின்கலம், பேசும் படங்களில் கோடுகளாகப்பதிவு செய்யப்பட்ட பேச்சு, பாடல்களை மறுபடியும் ஒலியாக்கப்பயன்படுகிறது. தொலைக்காட்சியின் ஒளிப்படக் கருவியில் (camera) ஒளி மாறுபாடுகளை மின்னழுத்த வேறுபாடுகளாய் மாற்றவும் ஒளிமின்விளைவு பயன்படுகிறது. மேலும், மின் உலைகளின் வெப்பநிலையை அளக்கவும், சூரியன் மறையும் நேரம் வெளிச்சம் குறைவதைக் கண்டு நகரவிளக்குகள் தாமாக ஏற்றப்படுதற்கும் ஒளிமின்கலங்கள் பயன்படுன்றன. சூரிய மின்கலங்கள் (solar cells) ஒளிமின்னழுத்த விளைவின் (photo-voltaic effect) மூலம் சூரிய ஒளிபட்டவுடன் மின்னழுத்தத்தை உருவாக்கும் தன்மையுடையன. அவை கணக்கிடும் பொறிகளிலும் (calculators), கிணற்றிலிருந்து நீர் இறைக்கப் பயன்படும் மின்னோடி (electric motor)யை இயக்கவும் பயன்படுகின்றன.

மாதிரிக் கணக்குகள்

1. 0.16 செ.மீ. விட்டமுள்ள தாமிரக்கம்பியின் வழியே மாறா மின்னோட்டமாய் 10 ஆம்பியர் பாய்கிறது. அதிலுள்ள எலெக்ட்ரானின் நகர்வு திசைவேகத்தையும், சராசரி மோதுகை நேரத்தையும், மோதலிடைத்தூரத்தையும் காண்க. 293 கெல்வினில் அதன் மின்எதிர்ப்புத்திறன் $= 2 \times 10^{-8}$ ஓம் மீட்டர்; சராசரி வெப்பத்திசைவேகம் $= 1.6 \times 10^{6}$ மீட்டர்/செகண்டு.

தாமிரத்தின் ஓரலகு பருமனில் உள்ள கடத்து எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை,

$$\text{‘}n\text{’} = \frac{\text{ஓர் அணுவிலுள்ள கட்டற்றஎலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை} \times \text{அவகட்ரோ எண்} \times \text{அடர்த்தி}}{\text{அணு எடை}}$$

$$= \frac{1 \times 6.023 \times 10^{26} \times 8960}{63.54} = 8.5 \times 10^{28} / \text{மீ}^3$$

சராசரி நகர்வு திசைவேகம் $\text{‘}v_d\text{’} = \frac{J}{ne} = \frac{i}{Ane}$

$$= 10 / \left(\pi \times (.08)^2 \times 10^{-4} \times 8.5 \times 10^{28} \times 1.602 \times 10^{-19} \right) = 36.5 \times 10^{-5} \text{ மீ/செ}$$

சராசரி மோதுகை நேரம் $\text{‘}\tau\text{’} = \frac{\lambda}{v} = \frac{m}{ne^2 \rho} = \frac{9.1 \times 10^{-31}}{8.5 \times 10^{28} \times (1.602 \times 10^{-19})^2 \times 2 \times 10^{-8}}$

$$= 2.085 \times 10^{-14} \text{ செகண்டு}$$

மோதலிடைத்தூரம் 'λ' $= \tau \bar{v} = 2.085 \times 10^{-14} \times 1.6 \times 10^{6} = 3.34 \times 10^{-8}$ மீட்டர்.

(2) தாமிரத்தில் 300 கெல்வினில் சராசரி மோதுகை நேரம் $= 2 \times 10^{-14}$ செகண்டு. இந்த வெப்பநிலையில் தாமிரத்தின் மின்கடத்துந்திறனைக் கணக்கிடுக.

$$\sigma = ne^2 \tau / m = \frac{8.5 \times 10^{28} \times (1.602 \times 10^{-19})^2 \times 2 \times 10^{-14}}{9.1 \times 10^{-31}} = 4.8 \times 10^{7} \text{ ஓம்}^{-1} \text{ மீ}^{-1}$$

சுருக்கம்

(1) ஒரு கடத்தியில் மின்புலம் செயல்படும்போது கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்கள் முடுக்கப்படுவதன் மூலம் அவற்றிற்குக் கிடைக்கும் திசைவேகமே நகர்வு திசைவேகம் எனப்படுகிறது.

(2) கடத்தியின் மின்கடத்துந்திறன் வெளிமின்புலத்தைச் சார்ந்ததில்லை. அது ஃபெர்மி மட்ட எலெக்ட்ரான்களின் மோதுகை நேரத்தையும், அவற்றின் செயலுறு நிறையையும், ஓரலகு பருமனில் உள்ள மொத்தக் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கையையும் சார்ந்துள்ளது.

(3) மின் கடத்துந்திறன் கடத்தியின் வெப்பநிலைக்கு எதிர்விகிதத்தில் உள்ளது.

(4) கடத்திக்கு மின்எதிர்ப்புத் திறன் இருவழிகளில் வருகிறது. ஒன்று அணிக்கோவை குறைபாடுகளாலும், மற்றொன்று வெப்பநிலை மாறுபாட்டால் ஏற்படும் அணிக்கோவை அதிர்வுகளாலும் வருகிறது.

(5) உலோகக் கலவைகளில் அடிப்படை உலோகத்தில் எவ்வளவுக் கெவ்வளவு வேற்று அணுக்கள் கலக்கப்படுகின்றனவோ அவ்வளவுக்கவ்வளவு அதன் மின் எதிர்ப்புத் திறனும் கூடுகிறது.

(6) மாறுதிசை மின்புலத்தில் கடத்தியின் மின்கடத்துந்திறன் குறைகிறது. மிக உயர் அதிர்வெண்களில் மின் கடத்தலே இராது. இதனால் உலோகங்கள் மிக உயர் அதிர்வெண் ஒளியைத் தம்முள் புகவிடாது பிரதிபலிக்கின்றன.

(7) திரிபளவியில் ஏற்படும் மின்தடைமாற்றத்தினால் அது பொருத்தப்பட்டுள்ள பொருளின்கண் உள்ள தகைவின் மதிப்பினைக் கண்டறியலாம்.

(8) வீட்மன்-ஃபிரான்ஸ் விதிப்படி உலோகங்களுக்கு $\frac{K}{\sigma T}$ ஒருமாறிலியாகும்.

(9) வெப்பமின் விளைவு மிகுதியாய் ஏற்படுத்த, தற்போது உலோகங்களுக்குப் பதிலாய்க் குறைகடத்திக் கலவைகள் உள்ளன. அவற்றின் ஆண்டிமணி டெலுரைடு, பிஸ்மத் டெலுரைடு முக்கியமானவை.

(10) வெப்ப மின்னிரட்டையின் செயல்திறனைத் தீர்மானிப்பது அதன் சிறப்புக் குறியெண் 'Z' ஆகும். சிறப்புக் குறியெண் மதிப்பு மிகுதியாயிருந்தால் வெப்ப மின்னியக்கு விசையும் மிகுதியாய்த் தோன்றும்.

(11) உலோகங்களில் புறப்பரப்பில் இருந்து வெப்பத்தாலும், மின்புலத்தாலும் ஒளிக்கதிர் வீச்சாலும் எலெக்ட்ரான்கள் உமிழப்படுகின்றன.

வினாக்கள்

(1) உலோகங்களில் மின்கடத்தல் பற்றிய சிறப்பு அம்சங்களைக் கூறுக. ட்ருடு-லாரென்ஸ் கருத்தியலைப் பயன்படுத்தி மின்கடத்துந்திறனுக்குரிய சமன்பாட்டைத் தருவி. அக் கருத்தியலில் உள்ள குறைபாடுகளையும் எழுதுக.

(2) ஓர் உலோகத்தின் மின்கடத்துந்திறனுக்கான கோவையைக் கவளக் கொள்கைப்படி கணக்கிடுக. மாசுப் பொருள்களும், வெப்பநிலையும் எங்ஙனம் மின் கடத்துந்திறனை மாற்றுகின்றன என்பது பற்றி விரிவாய்க் கூறுக.

(3) ஓர் உலோகத்திற்கு எந்தெந்த வழிகளில் மின் தடை ஏற்படுகிறது என்பதை விரிவாய் எழுதுக. மாறுதிசை மின்புலத்தில் மின்கடத்துந்திறன் எங்ஙனம் மாறுகிறது என்பது பற்றிச் சிறிது விளக்குக.

(4) வீட்மன்-ஃபிரான்ஸ் விதியை கூறி அதனைத் தருவி.

(5) வெப்பமின் விளைவை உண்டாக்கும் பொருள்கள் பற்றி விரிவாய் விளக்கி, அவற்றின் பயன்களைக் கூறுக.

(6) அறை வெப்பநிலையில் அலுமினியத்தின் மின்எதிர்ப்புத்திறன் மதிப்பு 2.62×10^{-8} ஓம்-மீட்டர். அதன் மோதுகை நேரத்தைக் கணக்கிடுக. மேலும் 100 வோல்ட்.மீ$^{-1}$ என்னும் அளவுள்ள மின்புலச்சரிவில் எலெக்ட்ரான் பெறும் கூடுதல் திசை-வேகத்தையும் கணக்கிடுக (0.7×10^{-14} செ, 0.1335 மீ/செ).

(7) சிறுகுறிப்பு வரைக :

அ) திரிபளவி
ஆ) வெப்ப அயனி உமிழ்வு
இ) வெப்பமின் பொருள்கள்
ஈ) ஒளிமின் விளைவு.

மேற்கோள் நூல் பட்டியல் :

1. 'Properties of Electrical Engineering materials' – G.C. Jain, Harper and Row, New York, 1967.
2. 'Electronic Processes in Materials' – L.V. Azaroff and J.J. Brophy, Mc Graw Hill, New York, 1963.
3. 'A Course in Electrical Engineering Materials' S.P. Seth and P.V. Gupta, Dhanpat Rai and Sons, Delhi, 1981.
4. 'Electrical Engineering Materials' – A.J. Dekker, Prentice – Hall, London, 1959.

7. காந்தப் பொருள்கள்

7.1 அறிமுகம்

காந்தப்பொருள்களில், காந்த இருமுனைவு (magnetic dipole) அல்லது காந்தத்திருப்புத்திறன் (magnetic moment) போன்றவற்றின் மூலம் காந்தத்தன்மைகள் உண்டாகின்றன. காந்தப்பொருள்கள் அனைத்தும் ஒருகாந்தப் புலத்தில் இருக்கும்போது அவை காந்தத்தன்மை பெற்ற ஊடகங்களாய் மாறிவிடுகின்றன. அதாவது அவை ஒருவெளிக்காந்தப்புலத்தில் இருக்கும் பொழுது, தாமாகவே ஒருசுய காந்தப்புலத்தைத் தோற்றுவிக்க முடியும். சுமார் பதினொன்று வகையான காந்தப்பொருள்கள் உள்ளன. அவற்றுள் முக்கியமானவை எதிர்க்காந்தம் (diamagnet), பாராக்காந்தம் (paramagnet), இரும்பியல் காந்தம் (ferromagnet), அல்லிரும்பியல் காந்தம் (antiferromagnet), ஃபெரிகாந்தம் (ferrimagnet) ஆகும். காந்தப் பொருள்கள் மின்பொறியியலில் முக்கியப் பங்கு வகிக்கின்றன. நிலைக்காந்தம் (permanent magnet), மின்மாற்றிகள் (transformers), ஆற்றல்மாற்றிகள் (transducers), மின்காந்தம் (electromagnet) போன்ற பல உபகரணங்களை உருவாக்கப்பயன்படுகின்றன. முதலில் காந்தவியலில் உள்ள சில முக்கிய அடிப்படை வரையறைகளைக் காண்போம்.

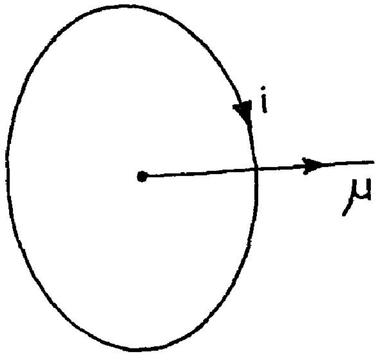
காந்தத்தூண்டல் 'B' (magnetic induction) :

ஒருகாந்தப்பொருளில் காந்தத் தூண்டல் 'B' என்பது செங்குத்தாய் ஓரலகு பரப்பின் வழிகடக்கும் மொத்தக் காந்தவிசைக் கோடுகள் அல்லது காந்தப்பாயம் (magnetic flux) ஆகும். அதன் அலகு வெபர்/மீ^{2} அல்லது டெஸ்லா (Tesla) ஆகும்.

காந்த இருமுனைவு (magnetic dipole) :

இஃது ஒரு நுண்காந்தமாகும். இந்நுண்ணியகாந்த இருமுனைவுகளில் எல்லாம் காந்தத்திருப்புத்திறன் இருக்கும். அஃது அணுமின்னோட்டத்தால் ஏற்படுகிறது. பொதுவாய் ஒருவட்டச்சுற்றின் வழியே 'i' ஆம்பியர் மின்னோட்டம் பாய்கிறது என்றும், அதன் குறுக்குப் பரப்பு 'a' சதுர மீட்டர் என்றும் எடுத்துக்கொண்டால் அந்த வட்டச்சுற்றில் ஒருகாந்தத்திருப்புத் திறன் உள்ளது என உடனே கூறிவிடலாம். மேலும், அதன் மதிப்பு 'i a' ஆம்பியர் மீ^{2}.

ஓர் அணுவிற்குப் பின்வரும் வழிகளால் காந்தத்திருப்புத்திறன்கள் உண்டாகின்றன. அணுவில் எலெக்ட்ரான், நேர்மின்னேற்றம் பெற்ற அணுக்கருவினைச்சுற்றி வரும்போது சுற்றியக்கக் காந்தத்திருப்புத்திறனும் (orbital magnetic moment), எலெக்ட்ரானின் தற்சுழற்சியால் தற்சுழற்சிக்காந்தத் திருப்புத்திறனும் (spin magnetic moment) உண்டாகின்றன. காந்தத்திருப்புத்திறன் ஒருவெக்டார் கணியம் ஆகும். சுற்றில் மின்னோட்டம் வலஞ்சுழியாய்ச் சென்றால் காந்தத்திருப்புதிறனின் திசை, சுற்றின் தளத்திற்குச் செங்குத்தாய்ப் படம் 7.1 இல் காட்டியவாறு இருக்கும்.



படம் 7.1 மின் சுற்றில் காந்தத்திருப்புத்திறனின் திசையும், மின்னோட்டத்தின் திசையும்.

மின்னோட்டத்தினால் ஏற்படும் காந்தத்திருப்புத்திறனே மின்சுற்றுக் கம்பியைச் சுற்றியுள்ள காந்தப்புலத்திற்குக் காரணமாகும். காந்தப் பொருள்கள் காந்த இருமுனைவுகளால் ஆனது. காந்த இருமுனைவு ஒன்றை உடம்பென எடுத்துக் கொண்டால் அதிலுள்ள உயிராய்க் காந்தத்திருப்புத்திறனை எடுத்துக் கொள்ளலாம். காந்தத் திருப்புத்திறன் 'μ' என்ற கணியம் காந்த இரு முனைவின் காந்த ஈர்ப்பின் திறனைக் கணிக்கப் பயன்படுகிறது.

காந்தமாக்கச்செறிவு 'I' (intensity of magnetisation) :

காந்தமாய் ஆக்கப்பட்ட ஒரு பொருளின் காந்தமாக்கச்செறிவு 'I' என்பது ஓரலகு பருமனில் தூண்டப்பட்ட காந்தத்திருப்புத்திறன் ஆகும்; அதன் அலகு ஆம்பியர்/மீ ஆகும்.

காந்தப்புலச்செறிவு 'H' (magnetic field intensity) :

ஒருகாந்தப்புலத்தின் கண் உள்ள ஒருபுள்ளியில் காந்தப்புலத்தின் செறிவு 'H' என்பது, ஓரலகு வடகாந்தமுனை அக்குறிப்பிட்ட புள்ளியில் இருக்கும்போது அதில் உண்டாகும் காந்தவிசையாகும். அதன் அலகு ஆம்பியர்/மீ ஆகும். ஆம்பியரின் விதிப்படி, $2\pi r$மீ சுற்றளவு கொண்ட ஒரு வட்ட மின்சுற்றில் 'i' ஆம்பியர் மின்னோட்டம் பாய்ந்தால், அதனால் ஏற்படும் காந்தப்புலச் செறிவின் மதிப்பைப் பின்வரும் சமன்பாட்டால் வரையறுக்கலாம். $H = \frac{i}{2\pi r}$ ஆம்பியர்/மீ. இங்கு 'r' என்பது வட்டத்தின் ஆரம் ஆகும்.

காந்த ஏற்புத்திறன் 'χ' (magnetic susceptibility) :

ஒருபொருளின் காந்த ஏற்புத்திறன் என்பது அப்பொருளைக் காந்தப்புலத்தில் வைக்கும்பொழுது அதில் தூண்டப்படும் காந்தமாக்கச் செறிவிற்கும் (I) அதனைத் தூண்டும் காந்தப்புலச் செறிவிற்கும் உள்ள விகிதமாகும்.

அஃதாவது, $\chi = \frac{I}{H}$

இஃது எந்த அளவிற்கு ஒருபொருள் காந்தத்தன்மையை ஏற்கும் என்பதனைக்குறிக்கும். இதற்கு அலகு ஏதும் இல்லை.

காந்த உட்புகுதிறன் 'μ'(magnetic permeability) :

ஒருபொருளின் காந்த உட்புகுதிறன் என்பது ஒருபொருளைக் காந்தப்புலத்தில் வைக்கும்பொழுது அதில் ஏற்படும் காந்தத்தூண்டலுக்கும் (B), அதனைத்தூண்டும் காந்தப்புலச்செறிவுக்கும் உள்ள விகிதமாகும்.

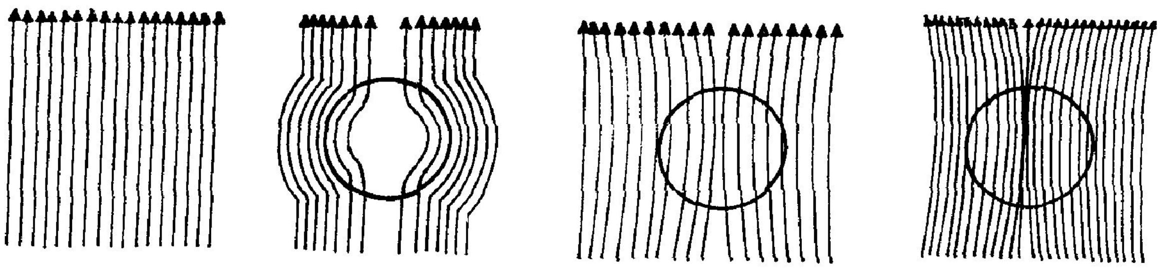
$$\text{அஃதாவது, } \mu = B/H \text{ *}$$

இதன் அலகு ஹென்றி/மீ. இச்சமன்பாட்டை $B = \mu_o (I + H)$ எனவும் எழுதலாம். இங்கு μ_o என்பது வெற்றிடத்தின் அல்லது காற்றின் காந்த உட்புகுதிறனாகும். ஒருபொருளின் ஒப்புமைக்காந்த உட்புகுதிறன் μ_r என்பது அப்பொருளின் காந்த உட்புகுதிறனுக்கும் வெற்றிடத்தின் காந்த உட்புகுத்திறனுக்கும் உள்ள விகிதமாகும்.

$$\text{அஃதாவது, } \mu_r = \mu/\mu_o = \frac{B/H}{B/(I+H)} = 1 + \frac{I}{H} = 1 + \chi$$

ஒப்புமைக்காந்த உட்புகுதிறனுக்கு அலகு ஏதும் இல்லை.

7.2 பல்வகைக் காந்தப்பொருள்கள்



(அ) சீரான காந்தப் புலம் (ஆ) எதிர்க்காந்தம் வைக்கப்பட்டவுடன் காந்தபுலத்தின் நிலை (இ) பாராக்காந்தம் வைக்கப்பட்டவுடன் காந்தபுலத்தின்நிலை (ஈ) இரும்பியல் காந்தம் வைக்கப்பட்டவுடன் காந்தப்புலத்தின்நிலை

படம் 7.2 (i) காந்தப்புலத்தில் காந்தப்பொருள்களின் தன்மைகள்.

(அ) எதிர்க்காந்தப் பொருள்கள் (diamagnetic materials) :

ஒருபொருளைக் காந்தப்புலத்தில் வைக்கும்பொழுது, அக்காந்தப்புலத்தால் அப்பொரு**ளில்** தூண்டப்படும் காந்தச் செறிவு, அதே காந்தப்புலத்தால் வெற்றிடத்தில்

* 'μ' என்ற ஒரே குறியீடு காந்தத்திருப்புத்திறனுக்கும், காந்த உட்புகுதிறனுக்கும் உலக வழக்கின்படி பயன்படுத்தப்பட்டுள்ளது. எனினும் இவ்விரு கணியங்களும் வெவ்வேறானவை. இச்சிறுகுழப்பத்தைத் தவிர்க்கவே காந்தஉட்புகுதிறனுக்குப் பதிலாக அதற்கு இணையான கணியமான காந்த ஏற்புத்திறனே பொருளின் காந்தப்பண்பை விளக்கப்புத்தகத்தில் முழுமையாகப் பயன்படுத்தப்பட்டுள்ளது.

தூண்டப்படும் காந்தப்புலச் செறிவை விடக் குறைவாயிருப்பின் அப்பொருள் **எதிர்க்காந்தம் அல்லது டயாக்காந்தம்** (diamagnet) எனப்படும். படம் 7.2 (i) (ஆ)யின்படி காந்தப்புலத்தில் எதிர்க்காந்தப்பொருள் இருக்கும் பொழுது பொருளின் ஊடே செல்லும் காந்த விசைக்கோடுகள் பொருளுக்கு வெளியில் செல்லும் காந்த விசைக்கோடுகளைவிடக் குறைவாயிருக்கும். இத்தகைய பொருள்களுக்கும் காந்தப் புலத்திற்கும் இடையில் ஓர் எதிர்விசை செயல்படும். அதனால், இத்தகைய பொருள்களில் காந்த ஏற்புத்திறன் எதிர்க்குறி (–) உடையதாயிருக்கும். ஒருவெளிக்காந்தப்புலம் இல்லாத பொழுது இப்பொருள்களில் உள்ள எலெக்ட்ரான் சுற்றுப்பாதைகளின் முகப்பு நிலைகள் (orientations), காந்தத்திருப்புத்திறன்களின் மொத்தமதிப்பு (வெக்டார் கூட்டல்)ச் சுழியாக உள்ளவாறு இருக்கின்றன. ஆனால், வெளிக்காந்தப் புலத்தில் இப்பொருள் இருக்கும் பொழுது, அக்காந்தப்புலம் ஒரு சுழற்சியை ஒவ்வொரு எலெக்ட்ரான் சுற்றுப்பாதைக்கும் கொடுக்கிறது அதன் மூலம் சுழியற்ற, தூண்டப்பட்ட காந்தத் திருப்புத்திறன் அப்பொருளுக்குக் கிடைக்கிறது. ஆனால், அதன் திசை வெளிக்காந்தப் புலத்தின் திசைக்கு எதிராயும். பொருளின் கண் உள்ள காந்தத்தூண்டலை குறைப்பதாயும் உள்ளது.

எதிர்க்காந்தப்பொருளின் காந்த ஏற்புத்திறன் மதிப்பு	வெப்பநிலை மாறுபட்டால் காந்த ஏற்புத்திறனில் ஏற்படும் மாறுதல்கள்	உதாரணங்கள்
(1) குறைவு, எதிர்க்குறி	மாறுதல் ஏதும்இல்லை	கரிமப்பொருள்கள் (organic materials), மென்தனிமங்கள் (light elements)
(2) நடுநிலை, எதிர்க்குறி	வெப்பநிலை 20 கெல்வின் என்று இருக்கும்பொழுது காந்த ஏற்புத்திறனின் மதிப்பு வெளிக்காந்தப்புலத்தையும், வெப்பநிலையையும் சார்ந்ததாயுள்ளது. பொதுவாக 20 கெல்வினுக்குக்கீழே வெப்பநிலை குறையக்குறையக் காந்தஏற்புத்திறன்மதிப்பும் குறைகிறது.	பிஸ்மத், காரமண்பொருள்கள் (alkaline earths)
(3) அதிகம், எதிர்க்குறி	இப்பொருள்களில்எதிர்க்காந்தத் தன்மை, மீக்கடத்து மாறுநிலை வெப்பநிலைக்கு (superconducting transition temperature) கீழேதான் உண்டாகின்றது. அந்நிலையில் காந்த ஏற்புத்திறனின் மதிப்பு வெப்பநிலையைச் சார்ந்துள்ளது.	நியோபியச் சேர்ம மீக்கடத்திகள், தாமிர ஆக்ஸைடு மீக்கடத்திகள்

சிறப்புக் குறிப்புகள் :

1. எதிர்க்காந்தப்பொருள்கள் காந்தவிசைக்கோடுகளை எதிர்க்கின்றன.
2. இப்பொருள்களில் நிலையான காந்த இருமுனைவு இல்லை. அதனால், இப்பொருள்களில் காந்தத்தன்மைகளும் மிகக்குறைவு.
3. பொதுவாய் வெப்பநிலை மாறுபாட்டிற்கும், காந்தப்புலமாறுபாட்டிற்கும் எதிர்க்காந்தப்பொருளின் காந்த ஏற்புத்திறனின் மதிப்பு மாறுபடாது.
4. இவ்வகைப் பொருள்களில் எலெக்ட்ரான்கள் சுற்றுப்பாதைகளில் சுற்றுவதால் காந்தத்தன்மைகள் உண்டாகின்றன.

(ஆ) ***பாராக்காந்தப் பொருள்கள்*** (paramagnetic materials) :

ஒரு பொருளைக் காந்தப்புலத்தில் வைக்கும்பொழுது அந்தக் காந்தப்புலம் அப்பொருளின் மீது தூண்டும் காந்தச் செறிவு, அதே காந்தப்புலம் வெற்றிடத்தில் தூண்டும் காந்தச்செறிவினை விடக் கூடுதலாயிருக்கும் பட்சத்தில் அப்பொருள் பாராக்காந்தம் எனப்படும். அதனால் படம் 7.2 (i) (இ)யில் காட்டியவாறு காந்தப்புலத்தில் பாராக்காந்தப் பொருள்கள் இருக்கும்போது ஓரலகு பரப்பின்வழியே செல்லும் காந்த விசைக்கோடுகள் பொருளுக்கு வெளியில் செல்லும் காந்த விசைக்கோடுகளை விடக்கூடுதலாயிருக்கும். இத்தகைய பொருள்களுக்கும் காந்தப்புலத்திற்கும் இடையே ஈர்ப்புவிசை செயல்படும். அதனால், பாராக்காந்த ஏற்புத்திறன் நேர்க்குறி (+) உடையதாயிருக்கும். ஒருவெளிக்காந்தப்புலம் இல்லாதபோது இப்பொருள்களில் உள்ள ஒவ்வொரு அணுவின் எலெக்ட்ரான் சுற்றுப்பாதைகளின் முகப்புநிலைகள், காந்தத்திருப்புத்திறன்களின் மொத்த மதிப்பு (வெக்டார் கூட்டல்) சுழியில்லாமல் ஒரு குறிப்பிட்ட அளவு இருக்குமாறு உள்ளன. வெளிக்காந்தப்புலத்தில் இப்பொருள் இருக்கும்போது அக்காந்தப்புலம் ஒருசுழற்சியை ஒவ்வொரு எலெக்ட்ரான் சுற்றுப்பாதைக்கும் கொடுத்து மிகுதியாய்த் தூண்டப்பட்ட காந்தத்திருப்புத்திறனை காந்தப்புலத்தின் திசையில் இருக்குமாறு உண்டாக்குகின்றது. அதனால், காந்தத் தூண்டல் பொருளினுள் மிகுதியாகிறது.

பாராக்காந்தப்பொருளின் காந்த ஏற்புத்திறனின் மதிப்பு	***வெப்பநிலை மாறுபாட்டால் காந்த ஏற்புத்திறனில் ஏற்படும் மாறுதல்கள்***	***உதாரணங்கள்***
(1) குறைவு, நேர்க்குறி	மாறுதல் ஏதுமில்லை	கார உலோகங்கள், பெயர்வு உலோகங்கள் (transition metals)
(2) மிகுதி, நேர்க்குறி	$\chi = C/(T-\theta)$ (கியூரி – வெய்ஸ் விதி) C = கியூரி மாறிலி, θ = கியூரி வெப்பநிலை. மேற்கூறிய விதியின்படி $T < \theta$ என்று இருக்கும் போது பாராக்காந்தம் எதிர்க்காந்தமாய்மாறுகிறது.	அருமண்பொருள்கள் (rare earths), பிளாட்டினம்.

சிறப்புக் குறிப்புகள் :

1. பாராக்காந்தப்பொருள்கள் காந்த விசைக்கோடுகளைத் தம்மை நோக்கிக் கவருகின்றன.
2. இப்பொருள்களில் நிலையான, காந்த இருமுனைவுகள் உள்ளன.
3. காந்த ஏற்புத்திறனின் மதிப்பு காந்தப்புலமாறுபாட்டால் மாறுபடாது.
4. காந்த இருமுனைவுகளிடையே ஏற்படும் இடைவினையால் இப்பொருள்களுக்குக் காந்தத் தன்மைகள் உண்டாகின்றன.

பாராகாந்தப் பொருள்களில் தற்சுழற்சி இணைப்பெறுமை : 

(இ) இரும்பியல் காந்தப்பொருள்கள் (ferromagnetic materials) :

ஒரு பொருள் மிகக் குறைந்த செறிவுடைய காந்தபுலத்தில்கூட மிகஅதிகக்காந்தத் தன்மையை அடைந்தால், அஃது இரும்பியல் அல்லது ஃபெரோ காந்தப்பொருளாகும்.

மேலும், இப்பொருள்களில் வெளிக்காந்தப்புலம் இல்லாதபொழுதுகூட நிறையக்காந்தத்திருப்புத்திறன்கள் உள. இது தன்னியல் காந்தமாக்கல் (spontaneous magnetisation) மூலம் வருகிறது. மேலும், இரும்பியல் காந்தத்தன்மை **இரட்டையாகா எலெக்ட்ரான்களுக்கு** (unpaired electrons) இடையே உள்ள பரிமாற்று இடைவினையால் (exchange interaction) உண்டாகிறது. இரும்பியல் காந்தப் பொருள்களுக்கும் காந்தப் புலத்திற்கும் இடையில் ஈர்ப்புவிசை ஏற்படும். ஆனால், இத்தகைய ஈர்ப்புவிசை பாராக்காந்தப் பொருளில் ஏற்படும் ஈர்ப்பு விசையைவிடப் பலப்பல மடங்கு மிகுதியாயிருக்கும்.

இவ்விதப்பொருள்களில் காந்த ஏற்புத்திறன் நேர்க்குறியுடையதாயும், மிக அதிகமானதாயும் இருக்கும். காந்த ஏற்புத்திறன் சிக்கலான முறையில் வெப்பநிலை மாறுபாட்டோடு இணைந்துள்ளது. பொதுவாக வெப்பநிலை பொருளின் கியூரி வெப்பநிலையைவிட மிகுதியாய் இருக்கும்போது காந்த ஏற்புத்திறன்,

$$\chi = C/(T - \theta) \quad \text{(பாராக்காந்தப்பகுதி)}$$

என இருக்கும். ஆனால், வெப்பநிலை கியூரி வெப்பநிலைக்குச் சமமாயிருக்கும்போது மேற்கண்ட சமன்பாட்டின்படி காந்தஏற்புத்திறன் வரையிலி (infinity) எனக்கொள்ளாமல் கொடுக்கப்பட்ட பொருள் இரும்பியல் காந்தநிலைக்கு வந்து விட்டது எனக் கொள்ள வேண்டும் (படம் 7.2 (ii) (அ)). பொருளின் வெப்பநிலை, கியூரி வெப்பநிலைக்குக் குறைவாயிருந்தாலும் பொருள் இரும்பியல் காந்தநிலையில்தான் இருக்கும். மேலும், அதன் காந்த ஏற்புத்திறனின் மதிப்பு மிக அதிகமாய் இருக்கும்.

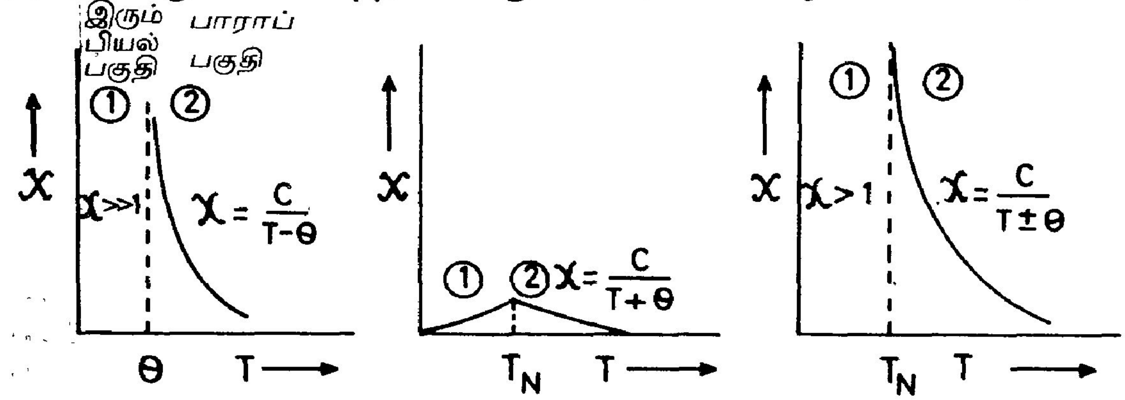
உதாரணங்கள் : இரும்பு (Fe), நிக்கல் (Ni), கோபால்ட் (Co).

சிறப்புக் குறிப்புகள் :

1. *பொருளின்கண் உள்ள அதிக உட்காந்தப்புலத்தால்* (internal magnetic field) *அதிக நிலையான காந்த இருமுனைவுகள் உள்ளன. மேலும், அவை ஒரே திசையில் இணைப்பெறுமையில்* (alignment) *இருப்பதால் நிறையத்தன்னியல் காந்தமாக்கல் (வெளிக்காந்தப்புலம் இல்லாமல்) நடைபெறுகிறது.*
2. *இரும்பியல் காந்தப்பொருள், காந்தவிசைக்கோடுகளை அதிக விசையுடன் தன்னகத்தே இழுக்கிறது.* (படம் 7.2(i)(ஈ))
3. *இரும்பியல் காந்தப்பொருள்கள் சூடாக்கப்படும்போது சிறிது சிறிதாய் தம் காந்தத் தன்மையை இழக்கின்றன.*
4. *காந்த ஏற்புத்திறன் காந்தப் புலத்தினால் எவ்வாறு வேறுபடுகிறது என்பதைத் தேக்கவிளைவுக் கண்ணி* (hysteresis loop) *விளக்குகிறது.*
5. *பொருள்களில் காந்தத்தன்மை, பெருங்கூறு* (domain) *அமைப்புகளால் வருகிறது.*

இரும்பியல் பொருள்களில் தற்சுழற்சி இணைப்பெறுமை : ↑↑↑↑

(ஈ) ***அல்லிரும்பியல் காந்தப் பொருள்கள்*** (Antiferromagnetic materials):



(அ) (ஆ) (இ)

படம் 7.2 (ii) ***வெப்பநிலைக்கேற்பக்காந்த ஏற்புத்திறன் மாறுபடும்விதம்***
(அ) இரும்பியல் காந்தப்பொருள்
(ஆ) அல்லிரும்பியல் காந்தப்பொருள் (இ) ஃபெரி காந்தப்பொருள்

இப்பொருளில் அடுத்தடுத்த காந்த அயனிகளில் உள்ள இரட்டையாகா எலெக்ட்ரான்களின் தற்சுழற்சி இணைப்பெறுமை எதிரிணையாய் (antiparallel) *இருக்கும். அதனால், பொருளின் மொத்தக் காந்தச்செறிவு சுழியாயிருக்கும். மேலும் காந்த ஏற்புத்திறனின் மதிப்பு மிகக்குறைவாயும் ஆனால் நேர்க்குறி* (+) *உடையதாயும் இருக்கும். இப்பொருளில் நீல் வெப்பநிலை* (Neel temperature) *என்ற மாறுநிலை வெப்பநிலை உள்ளது. அதற்குமேல் உள்ள வெப்பநிலைகளில் படம் 7.2* (ii)(ஆ) *வில் காட்டியவாறு வெப்பநிலை மிகுதியாகக் காந்த ஏற்புத்திறன் மதிப்புக்குறைகிறது. இதனை எதிர் ஃபெரோ காந்தப்பொருள் என்றும் கூறுவர்.*

உதாரணங்கள் : இரும்பு ஆக்ஸைடு (FeO), மாங்கனீசு ஆக்ஸைடு (MnO), குரோமியம் ஆக்ஸைடு (Cr_2O_3), பெயர்வுத் தனிமங்களின் உப்புகள்.

சிறப்புக் குறிப்புகள் :

(1) பொருளின் அடுத்தடுத்த காந்தத் திருப்புத்திறன்களின் எதிரிணைப் பெறுமை (antiparallel alignment) பரிமாற்று இடைவினையால் (exchange interaction) ஏற்படுகிறது.

(2) வெப்பநிலை உயரும்போது முதலில் காந்தஏற்புத்திறனின் மதிப்பு உயர்ந்துகொண்டே போய்ப்பின் பொருளின் நீல்வெப்பநிலையிலிருந்து குறைகிறது.

அல்லிரும்பியல் பொருள்களில் தற்சுழற்சி இணைப்பெறுமை : ↑↓↑↓

(உ) **ஃபெரி காந்தப்பொருள்கள்** (ferrimagnetic materials) :

இஃது அல்லிரும்பியல் காந்தத்தின் ஒருசிறப்பு நேர்வாகும். இதில் எதிரிணைப்பெறுமையில் உள்ள அடுத்தடுத்த காந்தத்திருப்புத்திறன்களின் மதிப்புச் சமமாக இல்லாமல் வேறுபட்டுள்ளது. அதனால், பொருளின் மொத்தக் காந்தச்செறிவு மிகுதியாயிருக்கும். அதனால், பொருளின் மொத்தக் காந்த ஏற்புத்திறன் மதிப்பு மிகுதியாயும் நேர்க்குறியுடையதாயும் இருக்கும். இவற்றின் காந்த ஏற்புத்திறன் வெப்பநிலை மாறுபடும்போது இரும்பியல் காந்தப்பொருளைப்போல் மாறுபடுகிறது (படம் 7.2 (ii) (இ)).

உதாரணங்கள் : இரும்பு ஃபெரைட், நிக்கல் ஃபெரைட்

ஃபெரிகாந்தப்பொருள்களின் தற்சுழற்சி இணைப்பெறுமை ↓↑↓↑

சிறப்புக்குறிப்பு : இப்பொருள்களில் மாறுபட்ட பெயர்வு உலோக அயனிகள் உள்ள தொகுதிகள் (sets) இரண்டு அல்லது அதற்கு மேலும் உள்ளன. அதனால் இவை அல்லிரும்பியல் காந்தப்பொருள்போல் இல்லாமல், மிகுந்த காந்தஏற்புத்திறனைப் பெற்றிருக்கின்றன.

7.3 எதிர்க்காந்தவியல் (Diamagnetism)

இலாஞ்சுவின் கொள்கை அல்லது மிகப்பழைய கொள்கை (Langevin Theory or Classical Theory) :

1905 இல் இலாஞ்சுவின் எதிர்க் காந்தவியல், பாராக் காந்தவியல் ஆகியவற்றிற்குரிய தம் விளக்கங்களை எலெக்ட்ரான் கொள்கை அடிப்படையில் வெளியிட்டார். எலெக்ட்ரான் கொள்கையின்படி அணு அதன் மையத்தில் ஒரு நேர்மின்னூட்டமுள்ள கருவினையும், அதனைச்சுற்றி வெவ்வேறு ஆரமுள்ள சுற்றுப்பாதைகளில் (orbits) வேகமாய்ச் சுற்றிவரும் எதிர் மின்னூட்டமுள்ள எலெக்ட்ரான்களையும் கொண்டது. அணுவின் காந்தப் பண்புகளை இத்தகைய நகரும் எலெக்ட்ரான்களைக் கொண்டு விளக்கமுடியும். எலெக்ட்ரான்கள் சுற்றுப்பாதையில் சுற்றிவருவதால் சுற்றுத்தளத்திற்குச் செங்குத்தாகக் காந்தப்புலம் தோன்றுகிறது. அதனால், அனைத்து எலெக்ட்ரான்

சுற்றுப்பாதைகளும் தம்மகத்தே காந்தத்திருப்புதிறன்களைக் கொண்டுள்ளன. ஆனால், எல்லாச்சுற்றுத்தளங்களும் இணையாயில்லாததால் சுற்றுகளின் சுழல் திசையும் ஒரே திசையில் இராது. அதனால், அனைத்துக் காந்தத் திருப்புத் திறன்களின் தொகுபயன் (வெக்டார் கூட்டல்) சுழியாய் அமைகிறது. ஆனால், வெளிக்காந்தப்புலத்தில், சுற்றுப்பாதையில் சுழலும் எலெக்ட்ரான்களின் திசைவேகம் மாறுபட்டு தூண்டப்பட்ட ஒருதொகுநிலை காந்தத்திருப்புத்திறன் உண்டாகிறது. அது லென்சு விதிப்படி (Lenz's law) வெளிக்காந்தப்புலத்தின் திசைக்கு எதிராக இருக்கும். அதனையே எதிர்க்காந்தத்தன்மை என்றும், இத்தன்மையை உடைய பொருள்களை எதிர்க்காந்தப்பொருள்கள் என்றும் கூறுகிறோம்.

கருத்தியல் (Theory) :

'ஓர் எலெக்ட்ரான், அதன் மையக்கருவைச்சுற்றி ஆரம் 'r_o' உள்ள சுற்றுப்பாதையில் 'ω_o' என்னும் கோணத்திசைவேகத்தில் 'e' என்னும் எதிர்மின்னூட்டத்துடன் சுற்றிவருகிறது' எனக் கொள்வோம். அதனால் உண்டாகும் மின்னோட்டம் $\frac{e\omega_o}{2\pi}$ ஆகும்.

$$\left[\because \text{ மின்னோட்டம் } = \frac{\text{மின்னூட்டம்}}{\text{அலைவு நேரம்}} = \text{மின்னூட்டம்} \times \text{அதிர்வெண்} \right]$$

அதனால், இச்சுற்று மின்னோட்டத்தால் ஏற்படும் காந்தத் திருப்புத்திறன்

$$\mu_e = ia = \frac{e\omega_o}{2\pi} \cdot \pi\, r_o^2$$

இங்கு 'a' என்பது வட்டச்சுற்றுப்பாதையின் பரப்பளவு ஆகும்.

$$\therefore \mu_e = \frac{1}{2} e\omega_o\, r_o^2$$

இந்த எலெக்ட்ரானின் கோணஉந்தம் 'L' $= m\omega_o\, r_o^2$

இதில் 'm' என்பது எலெக்ட்ரானின் நிறையாகும். அதனால், காந்தத் திருப்புத்திறனைக் கோணஉந்தத்தில் எழுத நமக்குக் கிடைப்பது,

$$\mu_e = eL/(2m)$$

போரின் கொள்கைப்படி (Bohr's Theory), $L = n\hbar$. இதில் $\hbar = h/2\pi$; h = பிளாங்க் மாறிலி ; n = இயல் எண். அதனால், எலெக்ட்ரானின் காந்தத்திருப்புத்திறன் $e\hbar/2m$ இன் மடங்குகளாயிருக்கும்.

அஃதாவது, $\mu_e = ne\hbar/2m$

இங்கு $e\hbar/2m$ என்பது போர் மேக்னாடான் (Bohr magneton) ஆகும். போர் மேக்னாடான் என்பது காந்தத்திருப்புத்திறனைக் குறிக்கும் அலகாகப் பயன்படுகிறது.

ஓர்அணுவின் மொத்தக் காந்தத்திருப்புத்திறன், சுற்றுப்பாதைகளின் மொத்த காந்தத்திருப்புத்திறனை வெக்டார் முறையில் கூட்டக் கிடைக்கிறது.

இலார்மர் (Larmor) என்பவர் எலெக்ட்ரானின் சுற்றுப்பாதைத்தளத்திற்கு நேர்குத்துத்திசையில் ஒருவெளிக்காந்தப்புலத்தை ஏற்படுத்தி, அதனால் எலெக்ட்ரான் இயக்கத்தில் ஏற்படும் விளைவினைக்கண்டு வெளியிட்டார். அஃது இலார்மரின் அச்சுச்சுழற்சி (Larmor's precession) எனப்படும். அதன்படி, காந்தவிசைக்கோடுகளின் திசையைச்சுற்றியுள்ள சுற்றுப்பாதையின் அச்சில் ஒருசுழற்சி வேகத்தைச் சேர்க்கிறது. ஆகையால் சுற்றுப்பாதைக்கு நேர்க்குத்தாக காந்தப்பாய அடர்த்தி 'B'யைத் தன்னகத்தே கொண்ட ஒரு வெளிக்காந்தப்புலத்தை ஏற்படுத்துவதால் எலெக்ட்ரானின் இயக்கத்தில் ஓர் அச்சுச்சுழற்சித் திசைவேகம் ஏற்படுகிறது.

இச்சுழற்சி வேகம் 'ω' $= -eB/2m$ ஆகும்.

இதனால், சுற்றுப்பாதையுடன் இணைந்துள்ள காந்தத்திருப்புத்திறனில் ஏற்படும் மாற்றம்

$$\Delta \mu_e = \mu_{e_{(\text{இறுதி})}} - \mu_{e_{(\text{தொடக்கம்})}}$$

$$= \frac{e r_o^2}{2}\left[(\omega + \omega_o) - \omega_o\right] = e r_o^2\, \omega/2 = \frac{-e^2 B r_o^2}{4m}$$

இச்சமன்பாட்டில் உள்ள எதிர்க்குறி, காந்தப்புலத்தை மிகுவிப்பதால் மின்னோட்டம் தூண்டப்பட்டு, அவ்வாறு தூண்டப்படும் மின்னோட்டம் காந்தப்புலத்திற்கு எதிரான ஒரு காந்தப்புலத்தைத் தோற்றுவிக்கும் என்பதைக் காட்டுகிறது. மேலும், இச்சமன்பாடு ஓர் எலெக்ட்ரான் கொண்டுள்ள அணுவிற்குக்கணக்கிடப்பட்டுள்ளது. பல எலெக்ட்ரான்களைக் கொண்ட அணுக்களுக்கு இச்சமன்பாட்டை எழுதும்போது அதனைப்பின்வருமாறு எழுதவேண்டும்.

$$\Delta \mu_A = \frac{-e^2 B}{4m} \sum r_o^2$$

எல்லாச் சுற்றுப்பாதைகளும் சமமாகவோ, வட்டப்பாதைகளாகவோ இரா. அதனால், r_o க்குப்பதிலாய் அதனுடைய சராசரி மதிப்பு $\bar{r}_o$ ஐ சமன்பாட்டில் இடவேண்டும். மேலும், ஒரு தளத்தில் $r_o^2 = r_x^2 + r_y^2$. ஒருகோளச்சமச்சீர் அணுவில் (spherically symmetric atom), $r_x^2 = r_y^2 = r_z^2 = \frac{1}{3} r^2$. இதில் r என்பது அணுஆரமாகும்.

$$\therefore \bar{r}_o^2 = \frac{2}{3} r^2$$

அதனால், $\Delta \mu_A = \frac{-e^2 B}{4m} \frac{2}{3} \sum r^2 = \frac{-e^2 B}{6m} \sum r^2$

எனவே, ஒருகிலோகிராம் அணுவிற்குரிய காந்தத்திருப்புததிறன்,

$$\Delta \mu = \frac{-N e^2 B}{6m} \sum r^2$$

இதில் 'N' என்பது அவகாட்ரோ எண் (Avagadro number). இதன் மதிப்பு ஒருகிலோகிராம் அணுவிற்கு 6.023×10^{26} அணுக்கள் ஆகும். $B = \mu_o H$. எனவே ஓர் அணுவில் அகக்காந்தத்திருப்புத்திறன் இல்லாதபோது அதன் கிலோகிராம் அணுக்காந்த ஏற்புத்திறன்,

$$\chi = \frac{\Delta \mu}{H} = \frac{-\mu_o N e^2}{6m} \sum r^2$$

முடிவுகள் :

(1) எதிர்க்காந்தப்பொருள்களில் காந்த ஏற்புத்திறன் எலெக்ட்ரான் சுற்றுப்பாதையின் அச்சுச்சுழற்சியால் ஏற்படுகிறது. ஆனால், அந்த அச்சுச்சுழற்சி அணுவின் மின்னேற்றப்பகிர்வினைப் பொறுத்து அமைந்துள்ளது.

அணுவின் வெப்பநிலை மாறுபட்டால் இந்த அச்சுச்சுழற்சியில் எவ்வித மாற்றமும் ஏற்படாது. அதனால், பொருளின் எதிர்க்காந்தத்தன்மை வெப்பநிலை மாறுபட்டால் மாறுபடாது. இதனை நாம் காந்த ஏற்புத்திறன் சமன்பாட்டில், வெப்பநிலை அல்லது அதனைச்சார்ந்திருக்கும் கணியம் ஏதும் இல்லாதிருப்பதன்மூலம் அறியலாம்.

(2) எதிர்க்காந்தவியல் இலார்மர் அச்சுச்சுழற்சியால் ஏற்படுவதால் எல்லாப பொருள்களும் அடிப்படையில் எதிர்க்காந்தப்பண்பினைக் கொண்டிருக்கவேண்டும். நிலையான காந்தத்திருப்புத்திறன் கொண்டுள்ள பொருள்களில் எதிர்க்காந்தப் பண்பு சிறிதே காணப்படுவதால் அவை பாராக்காந்தமாயும், இரும்பியல் காந்தமாயும் செயல்படுகின்றன.

கவளக் கொள்கைப்படி எதிர்க்காந்தத்திற்குரிய விளக்கத்தை வேன் வெலக் (Van Vleck) என்பவர் வெளியிட்டார். அவர் வெளியிட்ட சமன்பாட்டிற்கும் இலாஞ்சுவின் சமன்பாட்டிற்கும் சிறிதளவே வேறுபாடு உள்ளது. கவளக் கொள்கைச் சமன்பாட்டில் $1s$ எலெக்ட்ரான்களால் அணுவிற்கு வரும் எதிர்க்காந்தமும், மற்ற நிலையிலுள்ள எலெக்ட்ரான்களால் அணுவிற்கு வரும் எதிர்காந்தமும் தனித்தனியாய்க் குறிப்பிடப்பட்டுள்ளன. குறிப்பாக $1s$ நிலையிலுள்ள எலெக்ட்ரான்களை மட்டும் உடைய அணு அல்லது மூலக்கூறுகளை எடுத்துக்கொண்டால் இருசமன்பாடுகளும் சமமாயுள்ளன. மேலும், மற்றைய அணுக்களில் $1s$ நிலையிலுள்ள எலெக்ட்ரான்களுக்கு மட்டுமே எதிர்க்காந்தம் மிகுதியாயிருக்கும். மற்ற நிலையிலுள்ள எலெக்ட்ரான்களுக்குப் பாராக்காந்தம் மிகுதியாகி எதிர்க்காந்தம் மிகக்குறைவாய் இருக்கும். அதனால், கவளக்கொள்கையின்படி உள்ள சமன்பாட்டிற்கும், இலாஞ்சுவின் கொள்கையின்படி உள்ள சமன்பாட்டிற்கும் வித்தியாசம் ஏதும் இல்லை என்று கூறலாம்.

குறைபாடுகள் :

(1) இலாஞ்சுவின் பழங்கொள்கையும், வேன் வெலக்கின் கவளக்கொள்கையும் எதிர்க்காந்த ஏற்புத்திறன் வெப்பநிலை மாறுபட்டால் மாறுபடாது என்பதைத் தெளிவாகத் தெரிவிக்கின்றன. ஆனால், பெரும்பான்மையான பொருள்களில் குறிப்பாக மிகக்குறைந்த வெப்பநிலைகளில், காந்த ஏற்புத்திறனின் மதிப்பு வெப்பநிலை மாறுபாட்டால் சிறிதளவு மாறுபடுகிறது.

(2) இலாஞ்சுவின் சமன்பாட்டினை வருவிக்கையிலும், வேன் வெலக்கின் சமன்பாட்டினை வருவிக்கையிலும் பொருள்களின் இயற்பியல் நிலை (physical nature) பற்றிக் கவனத்தில் கொள்ளவில்லை. அதனால், பொருள்களின் இயற்பியல் நிலை அவற்றின் காந்த ஏற்புத்திறனைப் பாதிப்பதில்லை எனப் புலப்படுகிறது. ஆனால், ஆக்ஸாலி (Oxely) என்பவர் "பொருள்களின் இயற்பியல்நிலை மாறுபடும்போது காந்தத்திருப்புத்திறன்களின் மதிப்புகள் மாறுகின்றன" என்று கண்டார். மேலும், மூலக்கூறுகளின் இணக்கம் உள்ள நீர்மங்களில் வெப்பநிலை உயரும்போது அவற்றின் பிரிகைக் காரணமாகக் காந்த ஏற்புத்திறன் மதிப்பில் சிறிதளவு மாறுதல் நிகழ்கிறது.

7.4 *பாராக்காந்தவியல்* (Paramagnetism)

இலாஞ்சுவின் கொள்கை :

முதன்முதலில் பாராக் காந்தவியலுக்குரிய விளக்கத்தினை எலெக்ட்ரான் கொள்கைப்படி இலாஞ்சுவின் வெளியிட்டார். அதன்படி ஒருபாராக்காந்த வாயுவின் ஒவ்வொரு அணுவும் அல்லது மூலக்கூறும் μ அலகு நிலையான காந்தத்திருப்புத்திறனுடையதாகக் கொள்ளப்படும். இந்தக் காந்தத்திருப்புத்திறன், எலெக்ட்ரானின் சுற்றியக்க காந்தத்திருப்புத்திறனையும், தற்சுழற்சிக் காந்தத்திருப்புத்திறனையும் ஒரு குறிப்பிட்ட சேர்க்கையில் கலப்பதால் வருகிறது. வெளிக்காந்தப்புலம் இல்லாதபோது அணுக்களின் அல்லது மூலக்கூறுகளின் காந்தத்திருப்புத்திறன்கள் சீரற்று வெவ்வேறு திசைகளில் நிலைகொண்டிருக்கும். அதனால், அவற்றின் தொகுபயனைக்கணக்கிடும்போது அந்த வாயுவிற்குப் பயனுறு காந்தத்திருப்புத்திறன் ஏதும் இராது. இவ்வாறு இருப்பதற்குக் காரணம் அந்த வெப்பநிலையில் பொருளின்கண் உள்ள வெப்ப ஆற்றலின் அளவு காந்த இருமுனைவுகளின் இடைவினை ஆற்றலைவிட மிகுதியாயிருப்பதாகும்.

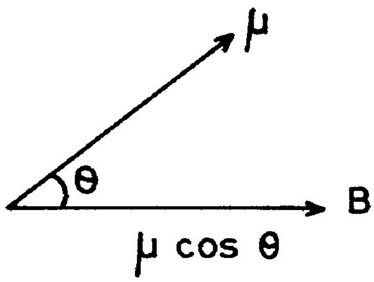
மூலக்கூறு அல்லது அணுவின் வெப்ப ஆற்றல் $= kT$

இதில் k என்பது போல்ட்ஸ்மேன் மாறிலி ; T என்பது வாயுவின் கெல்வின் வெப்பநிலை. ஆனால், வெளிக்காந்தப்புலம் வாயுவினுள் செலுத்தப்படும்போது ஒவ்வொரு மூலக்கூறும் அதன் அச்சு, காந்தப்புலத்திசையில் இருக்குமாறு தன்னை அமைத்துக்கொள்கிறது. சாதாரண வெப்பநிலைகளில் இந்த வாயுவின் மூலக்கூறுகள் வெப்பச்சலனத்திற்கு (convection) உட்படுவதால் எல்லா மூலக்கூறுகளும் காந்தப்புலத்திசையில் அமைய இயலாது. எனினும், பெரும்பான்மையான மூலக்கூறுகள் காந்தப்புலத்திசையில் அமைந்து ஒருசமநிலையில் இருக்கும். இதனால்

அவ்வாயுப்பொருள் காந்தப்புலத்திசையில் காந்தத் தன்மையடைகிறது. பொருளின் காந்தச்செறிவின் நிலையை வெளிக்காந்தப்புலமும், வெப்பநிலையும் தீர்மானிக்கின்றன. மேலும், இலாஞ்சுவின் கொள்கைப்படி பாராக்காந்தப் பொருள்களில் தன்னிச்சையாகச் செயல்படும் அணுக்கள், அயனிகள் இடையே இடைவினை ஏதும் இல்லாதபோது பாராக்காந்தம் உண்டாகிறது. அது பொருளில் உள்ள அணுக்களையும், அயனிகளின் காந்தத்திருப்புத்திறனின் மதிப்பினையும் அடிப்படையாகக் கொண்டது.

காந்தப்புலம் செயல்படாத நிலையில் வாயுவின் மூலக்கூறுகளின் திருப்புத்திறன்கள் பல திசைகளிலும் நிலைகொண்டிருக்கும். ஆனால் காந்தப்புலத்தில் ஒருகுறிப்பிட்ட திசையில் திருப்புத்திறன்கள் நிலைகொள்ளக்கூடிய நிகழ்தகவை மாக்ஸ்வெல் – போல்ட்ஸ்மேன் புள்ளியியல்(Maxwell – Boltzmann statistics) முறையில் கணக்கிடலாம்.

ஒருகாந்த இருமுனைவு வெப்பச் சமநிலையில் வெளிக்காந்தப்புலத்திற்கு θ கோணத்தில் நிலைகொண்டிருப்பதற்குக்குரிய நிகழ்தகவு $\exp(\mu B \cos\theta/kT)$க்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது. இதில் $\mu B\cos\theta$ என்பது காந்தப்புலத்தில் காந்த இருமுனைவின் நிலைஆற்றலாகும். 'n_o' என்பது வாயுவில் உள்ள மொத்தக் காந்த இருமுனைவுகள் எனவும், 'n' என்பது வெளிக்காந்தபுலத்திற்கு 'θ' என்ற கோணத்தில் நிலைகொண்டிருக்கும் காந்த இருமுனைவுகளின் மொத்த எண்ணிக்கை எனவும் கொண்டு, அதனைப்பின்வருமாறு எழுதலாம் : $n = n_o \exp(\mu B\cos\theta/kT)$. இதனை வகையீடு (differentiation) செய்ய,



படம் 7.3 காந்தப்புலத்திற்கும் காந்த இருமுனைவு திருப்புத்திறனுக்கும் இடையே கோணம் 'θ'

$$dn = -n_o \exp(\mu B\cos\theta/kT)\,(\mu B/kT)\sin\theta\, d\theta$$

வெளிக்காந்தபுலத்தின் திசையில் உள்ள சராசரி காந்தத்திருப்புத்திறன் $\bar{\mu} = \dfrac{\text{வெளிக்காந்தப்புலத்திசையின்கண் பகுபட்ட காந்தத்திருப்புத்திறன் கூறுகளின் கூட்டுத்தொகை}}{\text{வாயுவின் மொத்தக்காந்த இருமுனைவுகள்}}$

அஃதாவது, $\bar{\mu} = \dfrac{\int \mu\cos\theta\, dn}{\int dn}$

$$\therefore\ \bar{\mu} = \frac{\int \mu\cos\theta \exp(\mu B\cos\theta/kT)\sin\theta\, d\theta}{\int \exp(\mu B\cos\theta/kT)\sin\theta\, d\theta}$$

$\alpha = \mu B/kT$ என்று வைத்துக்கொண்டு θ-வினுடைய வரம்புகளை (limits)த் தொகையத்தில் (intergral) இட,

$$\bar{\mu} = \frac{\int_0^{\pi} \mu \cos\theta \exp(\alpha \cos\theta) \sin\theta \, d\theta}{\int_0^{\pi} \exp(\alpha\cos\theta) \sin\theta \, d\theta}$$

இப்பொழுது $\cos\theta = x$ என வை $\therefore -\sin\theta \, d\theta = dx$

$$\bar{\mu} = \frac{\int_{-1}^{1} \mu \, x \exp(\alpha x) \, dx}{\int_{-1}^{1} \exp(\alpha x) \, dx}$$

இச்சமன்பாட்டின் பகுதித்தொகையத்தையும், தொகுதித்தொகையத்தையும் தனித்தனியாய்த் தீர்ப்போம்.

$$\int_{-1}^{1} x \exp(\alpha x) \, dx = \int_{-1}^{1} x \, d[\exp(\alpha x)/\alpha] = \left[\frac{x \exp(\alpha x)}{\alpha}\right]_{-1}^{1} - \int_{-1}^{1} \frac{\exp(\alpha x) \, dx}{\alpha}$$

$$= \left[\frac{x \exp(\alpha x)}{\alpha}\right]_{-1}^{1} - \left[\frac{\exp(\alpha x)}{\alpha^2}\right]_{-1}^{1} = \left[\frac{e^{\alpha}}{\alpha} - \frac{e^{\alpha}}{\alpha^2}\right] - \left[\frac{-e^{-\alpha}}{\alpha} - \frac{e^{-\alpha}}{\alpha^2}\right]$$

$$= (1/\alpha)\,[e^{\alpha} + e^{-\alpha}] - (1/\alpha^2)\,[e^{\alpha} - e^{-\alpha}] = (2/\alpha)\,[\cosh\alpha] - (2/\alpha^2)\,[\sinh\alpha]$$

மேலும், $\int_{-1}^{1} \exp(\alpha x) \, dx = \left.\frac{e^{\alpha x}}{\alpha}\right|_{-1}^{1} = (1/\alpha)\,[e^{\alpha} - e^{-\alpha}] = (2/\alpha)\,[\sinh\alpha]$

சமன்பாட்டில் பகுதித் தொகையத்தின் மதிப்பினையும், தொகுதித் தொகையத்தின் மதிப்பினையும் இட,

$$\bar{\mu} = \frac{\mu\left(\frac{2}{\alpha}\cosh\alpha - \frac{2}{\alpha^2}\sinh\alpha\right)}{\frac{2}{\alpha}\sinh\alpha} = \mu\,(\coth\alpha - 1/\alpha)$$

இங்கு, $\coth\alpha = (\cosh\alpha)/(\sinh\alpha) = \frac{e^{\alpha} + e^{-\alpha}}{e^{\alpha} - e^{-\alpha}}$

$$\therefore \bar{\mu} = \mu \, L(\alpha)$$

இங்கு $L(\alpha)$ என்பது இலாஞ்சுவின் கோவை ஆகும். அதன் மதிப்பு $(\coth\alpha - 1/\alpha)$ ஆகும்

நேர்வு 1 :

α வின் மதிப்பு மிக அதிகமாய் இருப்பதாய்க் கொள்வோம். அஃதாவது, $\mu B >> kT$ அல்லது $\alpha \to \infty$. இந்த நேர்வின்படி பொருளின் கெல்வின் வெப்பநிலை குறைவாயிருக்கும் அல்லது வெளிக்காந்தப்புலம் மிகுதியாயிருக்கும். நாம் இந்நேர்விற்கு இலாஞ்சுவின் கோவையின் மதிப்பினைக் கண்டுபிடிப்போம்.

$$|L(\alpha)|_{\alpha \to \infty} = |\coth \alpha - 1/\alpha|_{\alpha \to \infty}$$

$$= \left| \frac{e^{\alpha} + e^{-\alpha}}{e^{\alpha} - e^{-\alpha}} - \frac{1}{\alpha} \right|_{\alpha \to \infty} = \left| \frac{1 + e^{-2\alpha}}{1 - e^{-2\alpha}} - 1/\alpha \right|_{\alpha \to \infty} = 1$$

$$\therefore \bar{\mu} = \mu$$

ஓரலகு பருமனில் உள்ள மொத்தக் காந்த இருமுனைவுகள் 'N' எனக்கொண்டால் காந்தமாக்கச்செறிவு, $I = N\bar{\mu} = N\mu = I_s$ இதில் I_s என்பது தெவிட்டிய காந்தமாக்கச் செறிவு ஆகும். அதனால், பொருளின் கெல்வின் வெப்பநிலை மிகக்குறைவாகவோ, வெளிக்காந்தப்புலத்தின் செறிவு மிக அதிகமாகவோ இருந்தால் பொருளில் ஏற்படும் காந்தமாக்கச் செறிவு, தெவிட்டிய நிலைக்குப் போய்விடும்.

நேர்வு 2 :

α வின் மதிப்பு மிகக்குறைவு எனக்கொள்வோம் ($\alpha \to 0$). அஃதாவது, $\mu B << kT$. இந்நேர்வின்படி பொருளின் வெப்பநிலை மிக அதிகமாகவோ, வெளிக்காந்தப்புலத்தின் செறிவு மிகக் குறைவாகவோ இருக்கும். இந் நேர்வுக்கு இலாஞ்சுவின் மதிப்பினைப் பின்வருமாறு கணக்கிடலாம்.

$$|L(\alpha)|_{\alpha \to 0} = \left| \frac{e^{\alpha} + e^{-\alpha}}{e^{\alpha} - e^{-\alpha}} - 1/\alpha \right|_{\alpha \to 0}$$

'α' வின் மதிப்புமிகக் குறைவாயிருப்பதால் $e^{\alpha}, e^{-\alpha}$ ஆகியவற்றை விரித்து எழுதி, அதில் முதல் நான்கு உறுப்புகளை மட்டும் எடுத்துக்கொள்வோம்.

$$|L(\alpha)|_{\alpha \to 0} = \left| \frac{1 + \alpha + \frac{\alpha^2}{2!} + \frac{\alpha^3}{3!} + 1 - \alpha + \frac{\alpha^2}{2!} - \frac{\alpha^3}{3!}}{1 + \alpha + \frac{\alpha^2}{2!} + \frac{\alpha^3}{3!} - 1 + \alpha - \frac{\alpha^2}{2!} + \frac{\alpha^3}{3!}} - \frac{1}{\alpha} \right|_{\alpha \to 0}$$

$$= \left| \frac{2 + \alpha^2}{2\alpha + \frac{2\alpha^3}{3!}} - 1/a \right]_{\alpha \to 0} = \left| \frac{2(1 + \alpha^2/2)}{2\alpha(1 + \alpha^2/6)} - 1/\alpha \right|_{\alpha \to 0}$$

இதில் $\left|1+\frac{\alpha^2}{6}\right|^{-1}$ ஐ விரித்தெழுதி, அதில் முதல் இருஉறுப்புகளை மட்டும் எடுக்க,

$$|L(\alpha)|_{\alpha \to 0} = \left|\frac{1}{\alpha}\left[1+\frac{\alpha^2}{2}\right]\left[1-\frac{\alpha^2}{6}\right]-\frac{1}{\alpha}\right|_{\alpha \to 0} = 2\alpha/6$$

$$\therefore |L(\alpha)|_{\alpha \to 0} = \alpha/3 = (\mu B/kT)/3$$

$$\text{எனவே,}\quad \bar{\mu} = \mu^2 B/(3kT)$$

$$\therefore \text{ பொருளின் காந்தமாக்கச்செறிவு, } `I' = N\bar{\mu} = \frac{N\mu^2 B}{3kT}$$

$B = \mu_o H$. ஆகையால், பொருளின் காந்த ஏற்புத்திறன் $`\chi' = \frac{I}{H} = \frac{N\mu^2\mu_o}{3kT} = \frac{C}{T}$

$$\text{இங்கு}\quad C = \frac{N\mu^2\mu_o}{3k} \quad \text{(கியூரி மாறிலி)}$$

இச்சமன்பாட்டை இலாஞ்சுவின் கணிதமுறையில் நிரூபிப்பதற்கு முன்னர் கியூரி, தம் சோதனையின்மூலம் கண்டறிந்தார். அதனால், இதனைக் கியூரி அல்லது **கியூரி-இலாஞ்சுவின் விதி** (Curie - Langevin law) என்பர்.

குறைபாடுகள் :

பெரும்பாலான பாராக் காந்தப்பொருள்கள் கியூரி இலாஞ்சுவின் விதிப்படி செயல்நிலையில் உள்ளன என்றாலும், சில குறைபாடுகளை நாம் இங்குக் காண்போம்.

(1) எல்லாப் பொருள்களும் அடிப்படையில் எதிர்க் காந்தப்பண்பினைக் கொண்டுள்ளன. அதனால், துல்லியமாய் ஒருபொருளின் பாராக்காந்த ஏற்புத்திறனைக் கணக்கிடும்போது அப்பொருளின் எதிர்க்காந்தத்திற்குரிய திருத்தத்தையும் கணக்கில் கொள்ளவேண்டும்.

(2) இலாஞ்சுவின் சமன்பாட்டை வருவிக்கையில் வாயுக்களின் இயக்கக் கொள்கையின் விதிகள் (kinetic theory of gases) பயன்படுத்தப்பட்டன. அதனால், மேலேகண்ட சமன்பாடு வாயுக்களுக்குமட்டும் அல்லது காந்த இருமுனைவு இடைவினையால் வரும் காந்த விளைவுகளைத் தோற்றுவியாத பொருள்களுக்கு மட்டும் ஏற்புடையது என்பது புலனாகிறது.

(3) நேர்வு (1) இன்படி கெல்வின் வெப்பநிலை சுழி என வைத்துக் கொண்டால் மிகக்குறைந்த வெளிக்காந்தப்புலத்தில் மூலக்கூறு காந்தங்கள் வெளிக்காந்தப் புலத்தின் திசையில் நிலைகொண்டுவிடும். அதனால், அப்பொருளில் தெவிட்டிய காந்தச்செறிவு உண்டாகும். ஆனால், இக்கருத்தை மனத்தில் கொள்ளும்போது பொருளின் நிலை மாற்றத்தை (phase change)க் கருத்திற் கொள்ள வேண்டும். இலாஞ்சுவின் கொள்கை

வாயுநிலையில் உள்ள பொருள்களுக்குமட்டும் பொருந்தும். ஆனால், சுழி கெல்வின் வெப்பநிலையில் வாயு, திடப்பொருளாய் மாறுவதுடன் அணுக்கள் அல்லது மூலக்கூறுகளுக்கு இடையே இடைவினை மிகுதியாயிருக்கும். அதனை நாம் கணக்கிற் கொள்ளவேண்டும். மேலும், அந்நிலையில் மாக்ஸ்வெல்-போல்ட்ஸ்மேன் புள்ளியியல் விதி பயன்படாது.

(4) நேர்வு (2) ஐ உயர்வெப்பநிலைகளில் மட்டும் பயன்படுத்தலாம். ஆனால், மிகக்குறைந்த வெப்பநிலையில் காந்த ஏற்புத்திறனின் மதிப்பு எவ்வாறு மாறுகிறது என்பதனை விவரிக்கவில்லை.

(5) அழுத்தப்பட்டதும், குளிர்படுத்தப்பட்டதுமான வாயுக்கள், திட உப்புகள், படிகங்கள் ஆகியவற்றின் காந்த ஏற்புத்திறன்கள் வெப்பநிலை மாறுபாட்டால் எவ்வாறு மாறுபடுகின்றன என்பதனை விவரிப்பதில் இலாஞ்சுவின் சமன்பாடு தவறிவிடுகிறது.

(6) மேலும், அது பாராக்காந்தத்திற்கும், இரும்பியல் காந்தத்திற்கும் உள்ள தொடர்பினை விளக்கவில்லை.

வெயிஸின் பாராக்காந்தக் கொள்கை :

வெயிஸ் (Weiss) என்பவர் இலாஞ்சுவின் கொள்கையில் உள்ள சில தவறுகளைக் களைதற்குக் கியூரி விதிக்குரிய சமன்பாட்டில் ஒரு திருத்தத்தை வெளியிட்டார். ஒவ்வொரு மெய்ம்மை வாயுவிலும் உள்ள மூலக்கூறுகள் அவைகளுடைய காந்தத்திருப்புத்திறன்களால் ஒன்றனையொன்று பாதிப்புக்கு உள்ளாகின்றன. இதனால், ஒரு உட்காந்தப்புலம் வாயுவினில் தோன்றுகிறது. மேலும், இந்த உட்மூலக்கூறு காந்தப்புலம் (molecular magnetic field) பொருளிலே ஏற்படும் காந்தச் செறிவிற்கு நேர்விகிதத்தில் இருப்பதாயும் அவர் எடுத்துக்கொண்டார்.

'H_i' உட்மூலக்கூறு காந்தப்புலமாயும், 'I' தூண்டப்பட்ட காந்தமாக்கச் செறிவாயும் கொண்டால், $H_i = \lambda I$. இங்கு 'λ' என்பது ஒருமாறிலியாகும். அதனை மூலக்கூறு காந்தப்புலக்குணகம் (molecular field coefficient) அல்லது வெயிஸ் மாறிலி என்று கூறுவர். அதனால், பொருளின்மீது செயற்படும் வெளிக்காந்தப்புலம் 'H' ஆனால், பொருளின் மீது செயற்படும் பயனுறு (effective) காந்தப்புலம், 'H' யையும் 'H_i'யையும் வெக்டார் முறையில் கூட்டிவரும் கூட்டுத்தொகையாகும். அஃதாவது, பயனுறு காந்தப்புலம் $H_e = H + H_i$. இலாஞ்சுவின் சமன்பாட்டில் இப்பயனுறு காந்தப் புலத்தின் மதிப்பினைஇட பொருளின் காந்தமாக்கச்செறிவு,

$$I = \frac{\mu_o \mu^2 N H_e}{3kT} = \frac{\mu_o \mu^2 N (H + \lambda I)}{3kT}$$

பொருளின் காந்த ஏற்புத்திறன்,

$$\chi = \frac{I}{H} = \frac{\mu_o N \mu^2}{3kT} + \lambda \frac{I}{H} \frac{\mu_o N \mu^2}{3kT}$$

கியூரிமாறிலி 'C' $= N\mu^2 \mu_o/3k$ எனவும், மற்றும்

கியூரி வெப்பநிலை 'θ' $= C\lambda = N\mu^2 \mu_o \lambda/3k$ எனவும் கொண்டால்

$$\chi = (C/T) + \chi \frac{\theta}{T}$$

$$\chi (1 - \theta/T) = C/T$$

$$\therefore \chi = \frac{C}{T(1 - \theta/T)} = \frac{C}{(T - \theta)}$$

இச்சமன்பாடே ***கியூரி-வெயிஸ் விதி*** (Curie - Weiss law) எனப்படும். இச்சமன்பாட்டில் இருந்து பொருள்களினுள் ஏற்படும் உட்காந்தப்புலத்தின் பயனாய்க் கியூரி வெப்பநிலைக்கு மேலே உள்ள வெப்பநிலைகளில் ($T > \theta$) காந்த ஏற்புத்திறன் பொருளின் வெப்பநிலைக்கு எதிர்விகிதத்தில் வேறுபடுகிறது. பொருளின் வெப்பநிலை கியூரி வெப்பநிலைக்குக்கீழே இருக்கும்போது ($T < \theta$) காந்த ஏற்புத்திறன் எதிர்க்குறியுடையதாய் மாறுகிறது. அதனால், பாராக் காந்தம் எதிர்க்காந்தமாய் மாறுகிறது. ஆனாலும், பாராக்காந்தப்பொருள்களுக்குக் கியூரி வெப்பநிலை மிகக் குறைவாயிருக்கும். அதனால் நேர்வு $T < \theta$ என்பது மிகவும் அரிதாயிருக்கும்.

பின்குறிப்பு : "கியூரிவெயிஸ்விதி, பெரும்பான்மையான பாராக்காந்தப்பொருள்களுக்குத் தோராயமாய்ப் பொருந்தினாலும் துல்லியமாய்ப் பார்க்கும்போது அந்த விதி முற்றிலும் சரியாய்ப் பொருந்தாது" என வெளியாயிற்று. அதனால், அலை எந்திரவியல் (Wave mechanics) அடிப்படையில் வேன்வெலக் பாராக் காந்தத்தன்மைக்குரிய ஒரு சமன்பாட்டை வெளியிட்டார். அதன்படி

$$\chi = \frac{\mu_o N \mu^2}{3kT} + \frac{2}{3}\mu_o \sum_{n' \neq n}^{N} \left(\frac{| m_o (n' ; n) |^2}{h\nu (n' ; n)} \right) - \frac{\mu_o N e^2 \sum r^2}{6m}$$

(1) $N\mu^2 \mu_o/3kT$ என்பது நாம் முன்பு கண்ட இலாஞ்சுவின் சமன்பாடாகும். வெப்பநிலைக்கு ஏற்ப மாறும் தன்மையுடையது.

(2) $m_o (n' ; n)$ என்பது எலெக்ட்ரான் அமைப்பின் கோணத் திருப்புத் திறனுக்குரிய அணிக்கோவை (matrix) அமைப்பின் குறுக்கு வரியில்லாத அமைப்பு. $\nu (n' ; n)$ – ஆற்றல் நிலைமாற்றத்தினால் நிகழும் உயர் அதிர்வெண் பாராக் காந்தப் பகுதி ; வெப்பநிலை மாற்றத்தினால் மாறாது. இங்கு 'n' என்பது முதன்மைக் கவளஎண்.

(3) $\dfrac{-\mu_o N e^2 \sum r^2}{6m}$ என்பது உள்ளடங்கிய எதிர்க்காந்தப்பகுதி. வெப்பநிலை மாறுபாட்டால் மாறாது.

பாராக்காந்தப் பொருள்களின் பயன்கள் :

இன்று நடைமுறையில் பயன்படக்கூடிய பல்வேறு மேசர்களிலும், லேசர்களிலும், மேசர், லேசர் நிகழ்ச்சிகளுக்கு ஏற்ற ஆற்றல் மட்டங்களையுடைய திடப்பொருள்களில் பெரும்பான்மையானவை பாராக் காந்தப் பொருள்களாகும். இப்பொருள்களில் நாம் விரும்பும் ஆற்றல்மட்டங்களைத் தோற்றுவிக்கலாம். சான்றாய் மாணிக்க லேசரில் (ruby laser) உள்ள அலுமினிய ஆக்ஸைடில் சிறிதளவு பாராக்காந்தக் குரோமியத்தைச் சேர்த்து லேசர் நிகழ்ச்சிக்குத் தேவையான ஆற்றல்மட்டங்களை உருவாக்குகிறோம். தற்போது மருத்துவத்துறையில் மூளையில் ஏற்படும் குறைபாடுகளைக் கண்டறிய உதவும் காந்த ஒத்திசைவு பிம்பமாக்கும் கருவி (magnetic resonance imaging device), மூளையில் உள்ள பாராக் காந்த ஆக்ஸிஜனை அடிப்படையாய் வைத்துச் செயல்படுகின்றது.

7.5 இரும்புக் காந்தவியல் (Ferromagnetism)

வெயிஸின் இரும்பியல் காந்தக்கொள்கை (Weiss Theory of Ferromagnetism):

பெயர்வு உலோகங்களாய இரும்பு, கோபால்ட், நிக்கல் ஆகியவைகளில் வெளிக்காந்தப்புலத்தை நீக்கிவிட்டாற்கூடக் காந்தமாக்கச் செறிவு உடையதாயுள்ளன. இதனையே நாம் 'இரும்புக் காந்தவியல்' என்று கூறுகிறோம். காந்தப்புலம் இல்லாத பொழுது இவ்வாறு காந்தமாக்கச் செறிவு பொருளில் ஏற்படுதற்குக் காரணம் தூண்டலற்ற தன்னியல் காந்தமாக்கல் (spontaneous magnetisation) ஆகும். இத்தன்னியல் காந்தமாக்கல் ஏற்படுதற்கு உட்மூலக்கூறு காந்தப்புலம் உதவி செய்கிறது என்றும், அது பொருளின் காந்தமாக்கச் செறிவிற்கு நேர்விகிதத்தில் இருக்கும் என்றும் வெயிஸ் எடுத்துக்கொண்டார்.

$$\therefore H_i = \lambda I$$

இதில் λ என்பது உட்மூலக்கூறு காந்தப் புலக்குணகம் அல்லது வெயிஸ் மாறிலியாகும். பொருளின்மீது செயற்படும் பயனுறு காந்தப்புலம் $H_e = H + H_i = H + \lambda I$. இலாஞ்சுவின் கொள்கைப்படி பொருளில் ஏற்படும் காந்தமாக்கச் செறிவு,

$$I = \frac{\mu_o N \mu^2}{3kT}(H + \lambda I)$$

அதனால், பொருளின் காந்த ஏற்புத்திறன்,

$$\chi = \frac{I}{H} = \frac{\mu_o N \mu^2}{3kT} + \lambda \frac{I}{H}\frac{\mu_o N \mu^2}{3kT}$$

$$\therefore \chi = C/(T - \theta) \quad \text{(கியூரி-வெயிஸ் விதி)}$$

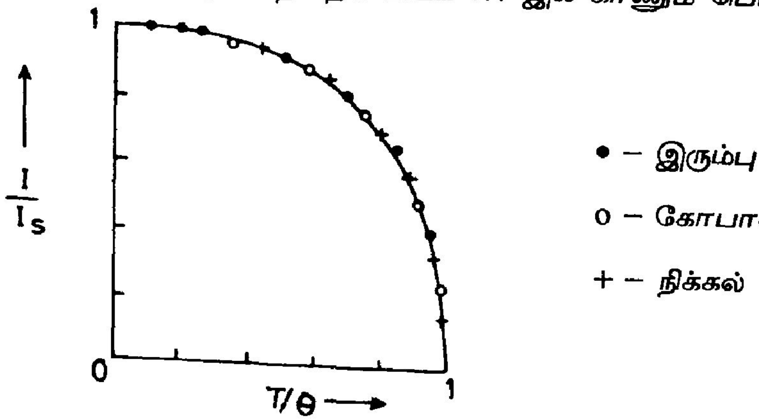
இதில், $C = N\mu^2 \mu_o / 3k$ (கியூரிமாறிலி), $\theta = N\mu^2 \mu_o \lambda / 3k$ (கியூரி வெப்பநிலை)

இதில் $T \to \theta$ எனக்கொண்டால் $\chi \to \infty$ எனவும், $T < \theta$ எனக் கொள்ளும்போது இந்த விதி ஓர் அர்த்தத்தையும் கொடுக்காது என நாம் எடுத்துக்கொள்ள வேண்டும். அஃதாவது, பொருளில் காந்தச் செறிவு வெளிக்காந்தப்புலம் இல்லாமலேயே உள்ளது என்பதே

மேற்கூறிய இருநேர்வுகளுக்கும் உள்ள பொதுவான பொருளாகும். இதில் "$T<\theta$ என்று இருக்கும்பொழுது பொருள் இரும்பியல் காந்தப் பொருளாயும், $T>\theta$ என இருக்கும்போது பொருள் பாராக் காந்தப் பொருளாயும் மாறுகிறது" என நாம் கொள்ள வேண்டும். ஏனெனில் $T>\theta$ என்ற நேர்வின் போது பொருளில் வெப்பக்கிளர்ச்சி மிகுதியாயிருக்கும். இதனால், வெயிஸ் மூலக்கூறு காந்தங்கள் ஒரே திசையில் நிலைகொள்ளாது பலதிசைகளில் நிலைகொள்ளும். இதனாலேயே இரும்பியல் காந்தப்பொருள் பாராக் காந்தமாய் மாறுகிறது. ஆனால் பொருளின் கெல்வின் வெப்பநிலை கியூரி வெப்பநிலையைவிடக் குறைவாயிருக்கும்போது வெயிஸ் காந்தப்புலம் வெப்பாற்றலைவிட மிகுதியாயுள்ளது. அதனால், அனேக மூலக்கூறுகாந்தங்கள் ஒரே முகப்புநிலையில் நிலைகொண்டுள்ளன. அதனால், தன்னியல்காந்தமாக்கல் தோன்றி இரும்பியல் காந்தம் ஏற்படுகின்றது. (ஆனால், அறை வெப்பநிலையில், ஒரு சாதாராண இரும்புத்துண்டு வெளிக்காந்தப்புலம் இல்லாமல் காந்தமாயிராது. இக்குறைபாட்டை நீக்கவே காந்தப்பெருங்கூறுகள் என்னும் ஒரு புது உத்தியை வெயிஸ் கையாண்டார். இதுபற்றி அடுத்த பகுதியில் காண்போம்).

தன்னியல் காந்தமாக்கலுக்கும் வெப்பநிலைக்கும் உள்ள தொடர்பு:

பரிசோதனையால் வரையப்பட்ட வரைபடத்தைப் படம் 7.4 இல் காணும் பொழுது



படம் 7.4 வெப்பநிலைக்கும் காந்தமாக்கச் செறிவுக்கும் உள்ள தொடர்பினைக் காட்டும் வரை. இரும்பு, கோபால்ட், நிக்கல் ஆகியவற்றினுடைய அளவிடப்பட்ட மதிப்புகளை வரையில் உள்ள புள்ளிகள் காண்பிக்கின்றன.

வெப்பநிலை சுழிகெல்வினாயுள்ள பொழுது $I/I_s=1$ ஆக மாறுவதால் தன்னியல் காந்தமாக்கல் பெருமத்தை அடைகிறது. படத்தில் I என்பது காந்தமாக்கச்செறிவு, I_s என்பது தெவிட்டிய காந்தமாக்கச்செறிவு, θ என்பது கியூரி வெப்பநிலை; மேலும் $T=\theta$ என்று உள்ளபொழுது $I/I_s=0$. அதனால் தன்னியல் காந்தமாக்கல் சுழியாகிறது. இதனைப் பின்வருமாறு விளக்கலாம். வெப்பநிலை மிகக்குறைவாயிருக்கும்பொழுது வெயிஸின் உட்காந்தப்புலம் வெப்ப ஆற்றலை விட மிகுதியாகவே இருக்கும். அதனால், கெல்வின் வெப்பநிலை $T=0$யாய் இருக்கும்பொழுது வெயிஸின் உட்காந்தப்புலம் மிக அதிக அளவில் தோன்றிக் காந்தமாக்கச் செறிவு தெவிட்டிய நிலையை அடைகிறது. ஆனால், வெப்பநிலை கூடக்கூட வெப்ப ஆற்றல் சிறிது சிறிதாய்க்கூடி. இணையாயுள்ள தற்சுழற்சி

காந்தத்திருப்புத்திறன்களை ஒழுங்கான நிலையிலிருந்து சிறிதுசிறிதாய் ஒழுங்கற்ற நிலைக்கு மாற்றுகிறது. அதனால், $T=\theta$ (கியூரி வெப்பநிலை) என்று இருக்கும்பொழுது எல்லாத் தற்சுழற்சி காந்தத் திருப்புத்திறன்களும் ஒழுங்கற்ற இணையில்லா நிலையில் இருப்பதால் தன்னியல் காந்தமாக்கல் சுழியாய் மாறிப்பொருள் பாராக்காந்தமாய் மாறுகிறது. $T=\theta$ என்னும் நிலையிலிருந்து வெப்பநிலை சிறிது குறைந்தாலும் உடனே தன்னியல் காந்தமாக்கல் தோன்றிக் காந்தமாக்கச் செறிவின் மதிப்பினைப் பன்மடங்கு உயர்த்துகிறது. காந்தத் திருப்புத்திறன்களும் இணைப்பெறுமை அடைகின்றன.

வெயிஸ் காந்தப்புலத்தின் மதிப்பு:

பொதுவாய் இரும்புக்குக் கியூரி வெப்பநிலை குறைந்தது 1000 கெல்வினாயிருக்கும். அதனால், கியூரி வெப்பநிலையில் காந்த இருமுனைவின் ஆற்றல் $\mu B_i = k\theta$. இங்கு 'k' என்பது போல்ட்ஸ்மேன் மாறிலியாகும். k, θ ஆகியவற்றின் மதிப்புகளைச் சமன்பாட்டில் இட, காந்த இருமுனைவின் ஆற்றல் கிடைக்கும். அதன்மூலம், உட்மூலக்கூறு காந்தப்புலத்தின் காந்தத்தூண்டல் மதிப்பு 10^3வெபர்/மீ^{2} எனக் கிடைக்கும். ஆனால் சாதாரணமாகக் காந்த இருமுனைவின் இடைவினையால் கிடைக்கும் காந்தத்தூண்டல் மதிப்பு 10^{-1}வெபர்/மீ^{2} . அதனால், அதிக அளவுள்ள உட் மூலக்கூறு காந்தப்புலத்தின் மதிப்பினைக் காந்த இருமுனைவின் இடைவினையால் விளக்க முடியாது. இதுவும் வெயிஸின் இரும்பு காந்தவியல் கொள்கை (மூலக்கூறு உட்காந்தப் புலக்கொள்கை)யின் குறைபாடுகளுள் ஒன்றாகும்.

ஹைஸன்பர்கின் இரும்பியல் காந்தக்கொள்கை:

கவளக்கொள்கையைப் பயன்படுத்தி ஹைஸன்பர்க் (Heisenberg) பின்வரும் ஒருகொள்கையை வெளியிட்டார். அதன்படி இரும்பியல் காந்தப்பொருள்களில் காந்தமாக்கச் செறிவு உட்மூலக்கூறு காந்தப்புலத்தினால் வருகிறது என்றும் அக்காந்தப்புலம் குறிப்பாய் எலெக்ட்ரான் தற்சுழற்சியினால் வருகிறதே அன்றி அதன் சுற்றியக்கத்தினால் வரவில்லை என்றும் கூறினார். இரு இரட்டையாகா எலெக்ட்ரான்களுக்கு (unpaired electrons) இடையில் ஏற்படும் பரிமாற்று இடைவினை விசையால் (exchange interaction force) இரும்பியல் காந்தப் பொருளில் உட்காந்தப்புலம் ஏற்படுகிறது. இவ்விசைகளைப் பரிமாற்றுவிசைகள் (exchange forces) எனவும் கூறுவர். இப்பரிமாற்று விசைகள் நிலைமின்கூலம் இடைவினையால் (electrostatic coulomb interaction) ஏற்படுகின்றன. மேலும், இவ்விசைகளின் மதிப்புக் காந்தத் திருப்புத்திறன்களின் இடைவினை விசைகளின் மதிப்பைவிட அதிகமாயிருக்கும். இப்பரிமாற்றுவிசை,தற்சுழற்சி-தற்சுழற்சி இடைவினை (spin-spin interaction) உருவில் உண்டாகிறது. இரும்பு அணிக்கோவைப்புள்ளியிலுள்ள அயனியின் ஆற்றல் நிலைகளில் ஒன்றான 3d நிலையில் உள்ள எலெக்ட்ரான் பக்கத்து அயனி 3d நிலை எலெக்ட்ரானுடன் பரிமாற்று இடைவினையினால் இரட்டையாகாமல் தற்சுழற்சிக் காந்தத் திருப்புத்திறனில் இணைப்பெறுமை (alignment) பெறுகிறது. இரு எலெக்ட்ரான்கள் இரட்டையாகி விட்டால் அவற்றின் காந்தத் திருப்புத்திறன்களின் தொகுபயன் சுழியாகிவிடும். இந்த பரிமாற்று இடைவினையின் திறன் அணு இடைத்தூரத்தைப் பொறுத்தது. மேலும் அஃது

அணு இடைத்தூரத்தைப் பொருத்து நேர்க்குறி உடையதாகவோ அல்லது எதிர்க்குறி உடையதாகவோ இருக்கும். இரு அணுக்களுக்கு இடையில் உள்ள தூரம் r_{ab} எனவும், எலெக்ட்ரானின் தற்சுழற்சி சமனாகாத ஆற்றல் கூட்டின் ஆரம் r_o எனவும் கொண்டால் ஒருபொருள் காந்தமடைதற்கு r_{ab}/r_o என்பதின் மதிப்பு மூன்றனைவிடச் சற்றுக்கூடுதலாகவேயிருக்க வேண்டும். பெயர்வு உலோகங்களில் 3d ஆற்றல் நிலையில் தற்சுழற்சியில் சமனாகாத எலெக்ட்ரான்கள் உள. பக்கத்திலுள்ள அணுக்களில் உள்ள தற்சுழற்சியில் சமனாகாத எலெக்ட்ரானுடன் சேர்ந்து தற்சுழற்சியில் இணை நிலைக்கு வரும். அணு இடைத்தூரம் குறையக்குறையப் பக்கத்து அணுக்களில் உள்ள எலெக்ட்ரான்களின் இணை நிலையில் உள்ள தற்சுழற்சிகளின் அமைப்பு மாறத் தொடங்குகிறது. ஒரு குறிப்பிட்ட தூரத்தைக் கடந்தவுடன் பரிமாற்று விசை மிகக்குறைந்து எலெக்ட்ரான்களின் தற்சுழற்சி எதிர் இணைநிலைக்கு வருகிறது. இந்த அமைப்பில் பொருளின் காந்தத் திருப்புத்திறன் மதிப்புச் சுழிக்கு அருகில் இருக்கும். ஏனெனில், பரிமாற்று விசை இப்பொருள்களில் எதிர்க்குறி உடையதாயுள்ளது. இரும்பியல் பொருள்களாய இரும்பு, கோபால்ட், நிக்கல் ஆகிய தனிமங்களில் r_{ab}/r_o என்ற விகிதம், முறையே 3.26, 3.64, 3.96 என்ற அளவில் உள்ளது. அதனால், பரிமாற்று விசை நேர்க்குறி உடையதாயும், இப்பொருள்களின் காந்தத் திருப்புத்திறன் மதிப்பு மிகுதியாயும் இருக்கும். அதனால், உட்மூலக்கூறு காந்தப்புலத்தின் காந்தத்தூண்டல் மதிப்புச் சுமார் 10^3 வெபர்/மீ^{2} என மாறுகிறது. அதனால், தன்னியல் காந்தமாக்கல் இப்பொருள்களில் மட்டும் நடைபெறுகிறது. இப்பரிமாற்றுவிசை மூலம் அல்லிரும்பு காந்தவியலையும், ஃபெரி காந்தவியலையும் விளக்கலாம் என ஹைஸன்பர்க், தம் கொள்கையில் வெளியிட்டார்.

7.6. பெருங்கூறு கொள்கை (Domain Theory)

வெயிஸ், தமது உட்மூலக்கூறு காந்தப்புலக் கொள்கையில் ஏற்பட்ட குறைபாடுகளைப் போக்கவும், இரும்பியல் காந்தப்பொருள்களில் ஏற்படும் தேக்க விளைவு (hysteresis) போன்ற குணங்களை விவரிக்கவும் 1907 இல் "பெருங்கூறு" கொள்கையை வெளியிட்டார். முதலில் "பெருங்கூறு" என்றால் என்ன என்பது பற்றிச் சிறிது காண்போம்.

ஒரு "பெருங்கூறு" என்பது இரும்பியல் காந்தப்பொருள் அல்லது ஃபெரி காந்தப் பொருளில் உள்ள ஒரு மீச்சிறுபகுதி அல்லது பரப்பிடம் ஆகும். அதில் எல்லாக் காந்தத் திருப்புத்திறன்களும் இணைநிலை கொண்டுள்ளன. அதனால், அது வெளிக்காந்தப்புலம் இல்லாமலேயே முழுக்காந்தத்தன்மையுடன் இருக்கும். ஓர் இரும்பியல் பொருளில் இவ்விதப் பெருங்கூறு அமைப்புகள் உள்ளன. ஆனால் ஒவ்வொரு பெருங்கூறிலும் காந்தமாக்கச் செறிவு வெக்டார், வெவ்வேறு திசைகளில் முகப்புநிலை கொண்டிருக்கும். அதனால், காந்தமேற்றுச் சுற்றில் (magnetisation cycle) ஈடுபடாத சுத்தமான இரும்பியல் பொருள்களின் துண்டுகளில் வெளிக்காந்தப்புலம் இல்லாதபொழுது காந்தமாக்கச் செறிவு என்பது ஏதும் இராது. ஆனால், ஓர் இரும்பியல் பொருள் வெளிக்காந்தப்புலத்தில் இருக்கும்பொழுது தொடக்க நிலையில் காந்தமாக்கச்செறிவு அப்பொருளில் சிறிது சிறிதாய்க்கூடும். அச்சமயத்தில் வெளிக்காந்தப்புலத்தின் திசைக்கு இணையாய்க் காந்தத் திருப்புத்திறன் முகப்புநிலை உள்ள பெருங்கூறுகளின் பரப்புக்கூடும். முடிவில்

காந்தமாக்கச்செறிவின் தெவிட்டிய நிலையில் வெளிக்காந்தப்புலத்திற்கு இணையாய்த் தங்கள் காந்தத் திருப்புத்திறன்களை அமைக்கப் பெருங்கூறுகள் சுழல்கின்றன. அதேபோல் பொருளில் உள்ள காந்தமாக்கச் செறிவைக் குறைக்கும்பொழுது அல்லது பொருளைக் காந்தமிழக்கச் செய்யும்போது காந்தமாக்கச் செறிவின் தெவிட்டியநிலையில் உள்ள பெருங்கூறுகளின் ஒழுங்கான அமைப்பு மாறத்தொடங்குகிறது. எனினும், தொடக்கநிலையிலிருந்த அமைப்பிலிருந்து மாறுபட்டுப் பெருங்கூறு, முடிவில் முகப்புநிலை கொள்வதால் பொருளில் சிறிது காந்தமாக்கச்செறிவு இருக்கும். அதனால் தேக்கவிளைவு இரும்பியல் பொருள்களில் உண்டாகிறது.

மேலும், இப் "பெருங்கூறு" கொள்கையால் பின்வரும் பண்புகளையும் விளக்க முடியும்:

(1) ஒரு காந்தம் சிறிய துண்டுகளாயுடைந்தால் உடைந்த ஒவ்வொரு துண்டும் காந்த வட, தென் துருவங்களைக் கொண்ட ஒரு காந்தமாய் விளங்கும். இதற்குக் காரணம் உடைந்த துண்டுகளிலும் "பெருங்கூறுகள்" முதலிருந்த அதே அமைப்பில் இருப்பதேயாகும்.

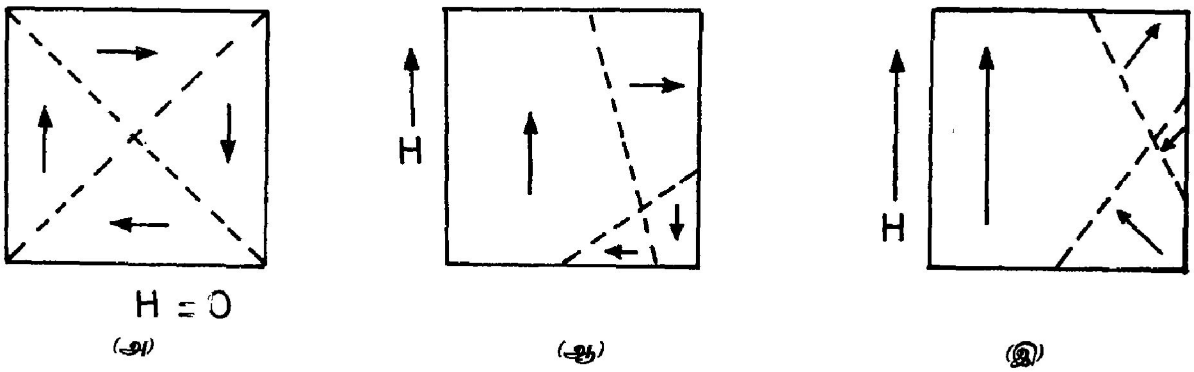
(2) ஒரு காந்தத்தை வெப்பப்படுத்தும் பொழுதோ அல்லது அதனை முரட்டுத்தனமாய்க் கையாளும்பொழுதோ அதன் காந்தத்தன்மை குறைகிறது. இதற்குக் காரணம் பெருங்கூறுகளின் அமைப்பில் உருக்குலைவு ஏற்படுவதேயாகும். அதனால் காந்தத் தன்மை குறைகிறது.

(3) குறைந்த அளவு காந்தமாக்கும் விசையில் தேனிரும்பு எனப்படும் மென்இரும்பில் (soft iron) பெருங்கூறுகள் எளிதாய்ச் சுழன்று வெளிக்காந்தப்புலத்தின் திசைக்கு இணையாய்த் தங்கள் காந்தத் திருப்புத்திறன்களை அமைக்க முடியும். அதனால், மென் இரும்பினை எளிதில் காந்தமாக்கிவிடலாம். ஆனால், எஃகினில் (steel) 'பெருங்கூறுகள்' சுழலக் காந்தமாக்கும் விசை மிகுதியாய்த் தேவைப்படுகிறது. அதனால், அதனை எளிதில் காந்தமாக்கிவிட முடியாது; அதே போல் எளிதில் காந்தமிழக்கச் செய்யவும் முடியாது. மேலும், இதனால், எஃகு இரும்பின் அதிகமான மீந்தக் காந்தத்தன்மை (residual magnetism) அல்லது தேக்குத்திறனை (retentivity) விளக்கலாம்.

(4) ஓர் இரும்பியல் பொருளைக் காந்தமாக்கும் பொழுது அதன் நீளத்தில் சிறிது மாற்றம் ஏற்படுகிறது. இதற்குக் காரணம் அதிலுள்ள பெருங்கூறுகளின் மாற்றமைப்பேயாகும். இதனையே காந்தப் பரிமாண மாற்றம் (magnetostriction) என்கிறோம்.

7.7. பெருங்கூறுகளின் இணைப்பெறுமை (Alignment of domains)

ஒழுங்கிலாப் பெருங்கூறுகளின் அமைப்பினை ஒரே நிலையில் கொண்டுவர வெளிக்காந்தப் புலம் தேவையாகிறது. அங்ஙனம் "பெருங்கூறுகள்" ஒரு நிலைக்குவர இருவழிகள் உள.



படம் 7.5. பெருங்கூறுகளை ஒருநிலைப்படுத்திக் காந்தமாக்கும் செய்முறைகள். படம் (ஆ) வில் வெளிக்காந்தப்புலத்தின் திசையில் முகப்புநிலை கொண்டுள்ள பெருங்கூறின் பரப்பு கூடியிருப்பதையும், படம் (இ)யில் வெளிக்காந்தப்புலத் திசையில் முகப்புநிலை கொள்ளப் பெருங்கூறுகள் சுழற்சியடைவதையும் கவனிக்கவும்.

(அ) பெருங்கூறு சுவர் இயக்கம் (domain wall motion):

வெளிக்காந்தப்புலத்தின் மதிப்பினைக்கூட்டிக்கொண்டே போனால் பெருங்கூறு சுவர்களின் இயக்கத்தால் வெளிக்காந்தப் புலத்திற்கு ஏதுவாய் முகப்புநிலை உள்ள பெருங்கூறுகளின் பருமன் அதிகரித்துக் கொண்டேயும், வெளிக்காந்தப் புலத்திற்கு ஏதுவாய் முகப்புநிலை இல்லாத பெருங்கூறுகளின் பருமன் குறைந்து கொண்டேயும் போகும். படம் 7.5 (அ)வில் ஒரு சுத்தமான படிகத்தில் பெருங்கூறுகளின் காந்தத் திருப்புத்திறன்களின் தொகுபயன் சுழியாயுள்ளதைக் காட்டுகிறது. படம் 7.5 (ஆ)வில் பெருங்கூறு சுவர்களில் இயக்கத்தால் வெளிக்காந்தப் புலத்திற்கு ஏதுவாய் முகப்புநிலை உள்ள பெருங்கூறுகளின் பரப்பு கூடியிருப்பதைக் காட்டுகிறது. இம்மாதிரிக் காந்தமாக்கல், குறைந்த மதிப்புள்ள வெளிக்காந்தப்புலத்தில் நடைபெறுகிறது.

(ஆ) பெருங்கூறுகளின் சுழற்சி (rotation of domains)

படம் 7.5 (இ)ல் காட்டியவாறு வெளிக்காந்தப்புலத்தின் மதிப்பு மிகுதியாயிருக்கும்பொழுது வெளிக்காந்தப்புலத்தின் திசைக்கு இணையாய் வரப் பெருங்கூறுகளின் காந்தச்செறிவு வெக்டார் சுழற்சியடைகிறது. இதனால், பெருங்கூறுவின் காந்தத்திருப்புத்திறன் சுழன்று வெளிக்காந்தப்புலத்தின் திசைக்கு இணையாய் முகப்பு நிலை கொள்ளும். இது மிகக் கடினமான முறையாகும். பெரும்பாலும், இரும்பியல் பொருளானது தெவிட்டுகாந்தச் செறிவை அடையும்போது இம்மாதிரியான சுழற்சிமூலம் காந்தமாக்கல் நடைபெறுகிறது.

7.8 பெருங்கூறுகளோடு தொடர்பு கொண்டுள்ள ஆற்றல்கள்

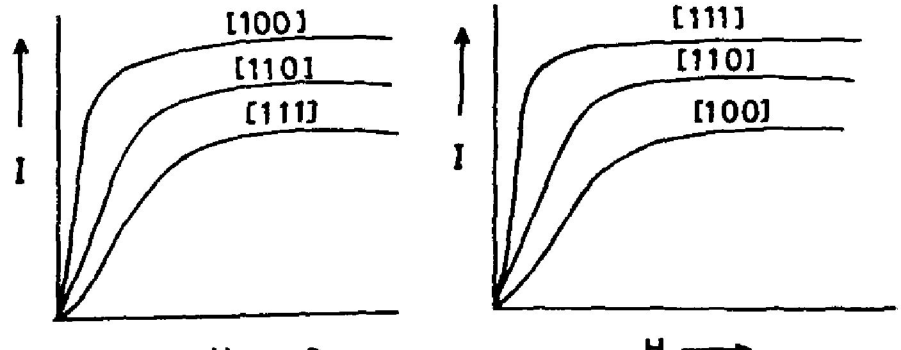
பெருங்கூறுகளின் உள்ளமைப்புப்பற்றித் தெரிய வேண்டுமானால், பெருங்கூறுகளின் வளர்ச்சியில் பங்குகொள்ளும் நான்குவித ஆற்றல்களைப் பற்றி முதலில் தெரிய வேண்டும்.

(அ) பரிமாற்று ஆற்றல் (Exchange energy):

ஒருபெருங்கூறில் உள்ள பரிமாற்று ஆற்றலே ஒழுங்கிலா அணுக்காந்த இருமுனைவுகளை ஒருநிலைப்படுத்திப்பெருங்கூறைக் காந்தச்செறிவு உடையதாய் மாற்றுகிறது. இவ்வாற்றல் எலெக்ட்ரான் தற்சுழற்சிகளின் இடைவினை மூலம் வருகிறது. இதுபற்றி ஹைஸன்பர்க் இரும்பியல் காந்தக்கொள்கையில் பார்த்தோம். மேலும், இதுபற்றி நீலின் ஃபெரி காந்தக் கொள்கையிலும் சிறிது பார்க்கப்போகிறோம். பரிமாற்று ஆற்றல் இரட்டையாகா எலெக்ட்ரான் தற்சுழற்சிகளினால் வருகிறது. மேலும், அஃது அணு இடைத்தூரத்தைச் சார்ந்துள்ளது. பெருங்கூறின் முழுவளர்ச்சியில் இந்தப்பரிமாற்று ஆற்றல் முக்கியப்பங்கு வகிக்கிறது.

(ஆ) படிகத்திசையொவ்வாப் பண்பியலாற்றல் (Crystal anisotropic energy):

இஃது ஒருபடிகத்தைக் காந்தமாக்கத்தேவையான ஆற்றலை வரையறுக்கிறது. இவ்வாற்றல் படிகத்தின் முகப்பு நிலையைப் பொறுத்துள்ளது. படிகங்களில் சில திசைகள் உள்ளன. ஒரு படிகத்தின் குறிப்பிட்ட திசையில் வெளிக்காந்தப் புலத்தின் திசை அமைந்து, குறைந்த மதிப்புள்ள வெளிக்காந்தப்புலத்தில் அப்படிகம் தெவிட்டு காந்தமாக்கச் செறிவு அடையுமானால் அதனை எளிய திசை (easy direction) என்று கூறுவர். சில படிகத்திசைகளில் வெளிக்காந்தப்புலத்தின் திசை அமைந்தால் படிகம் தெவிட்டு காந்தமாக்கச் செறிவு அடைய, அதிக அளவு வெளிக்காந்தப்புலம் தேவைப்படும். அவ்விதப்படிகத் திசைகளைக் கடின திசைகள் (hard directions) என்பர். உதாரணமாக உருவமையக் கனசதுர இயலமைப்புடைய இரும்பில் (BCC Iron) [111] கடினதிசை; ஆனால் [100] எளிய திசையாகும். இந்த இருதிசைகளில் தனித்தனியே வெளிக்காந்தப் புலத்தைச் செலுத்தித் தெவிட்டு காந்தமாக்கச் செறிவை அடைய வெவ்வேறு ஆற்றல்கள் தேவைப்படுகின்றன. அவ்வாற்றல்களின் வேறுபாடு 1.4×10^4 ஜூல்/மீ^{3}. அதனால் [111] திசையில் தெவிட்டு காந்தமாக்கச் செறிவு கிடைக்கச் சற்று மிகுதியான ஆற்றலைச்



(அ) உருவமையக் கனசதுர இரும்பு (ஆ) முகமையக் கனசதுர நிக்கல்

படம் 7.6 இரும்பு, நிக்கல் ஆகியவற்றின் படிகத்திசையொவ்வாப் பண்பியலாற்றல்களைக் காட்டும் வரைகள்.

(1.4×10^4 ஜூல்/மீ^{3}) செலவழிக்க வேண்டியுள்ளது. இதனையே படிகத்திசையொவ்வாப் பண்பியலாற்றல் என்பர். மேலும், முகமையக் கனசதுர இயலமைப்புடைய நிக்கலில் (FCC Nickel), [111] திசையே எளிய திசையாகவும், [100] கடின திசையாகவும் உள்ளன. அஃதாவது, நிக்கலில் எளிய திசை அதன் உருவ மூலைவிட்டங்கள் (body diagonals) ஆகும். இப்படிகத்திசையொவ்வாப் பண்பியலாற்றலே பெருங்கூறுகளைப் பிரிக்கும் எல்லைகளின் இயல்பினைக் கண்டுபிடிக்க மிக அவசியமானதாகும்.

பெருங்கூறு சுவர் அல்லது பிளாக் சுவர் (Bloch wall) **ஆற்றல்:**

இது பெருங்கூறு சுவர்ப்பகுதியில் உள்ள பரிமாற்று ஆற்றல், திசையொவ்வாப் பண்பியல் ஆற்றல் ஆகியவற்றின் கூட்டுத்தொகையாகும். இருபெருங்கூறுகளைப் பிரிக்கும் எல்லையைப் பிளாக் சுவர் என்கிறோம். சுவரின் பருமன் சுமார் 1000 ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகளாயிருக்கும்.

(இ) காந்த நிலைஆற்றல் (Magnetostatic energy):

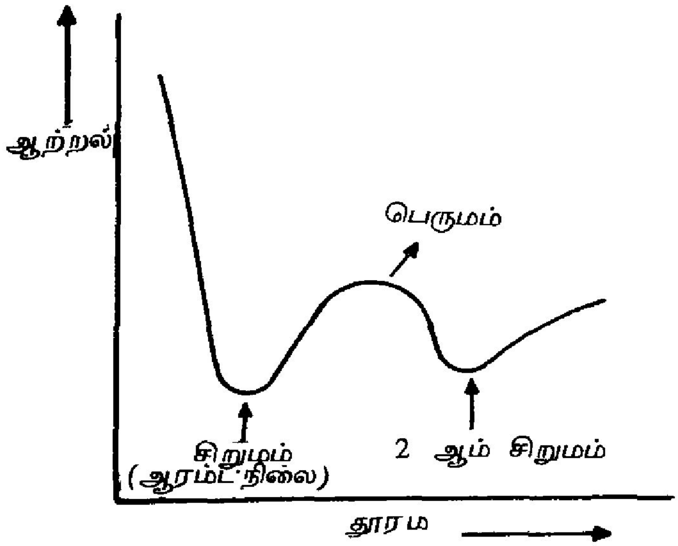
ஓர் இரும்பியல் காந்தப்பொருள், தானே ஒருவெளிக்காந்தப்புலத்தை உண்டாக்கினால் அதிக காந்த நிலைஆற்றல் உள்ளது எனக் கூறலாம். காந்த நிலை ஆற்றல் மிகுதியாயிருக்குமானால் அது வெளிக்காந்தப் புலத்தையும் மிகுதியாக்கும். மேலும், அதிலுள்ள அநேகப் பெருங்கூறுகள் ஒரே திசையில் முகப்புநிலை கொண்டிருக்கும். அப்பொருளில் அதிகமான காந்த இருமுனைவுகள் ஒரே திசையில் இணைப்பெறுமை பெற்றிருப்பதால்தான் காந்த நிலைஆற்றல் தோன்றுகிறது. பெருங்கூறு வளர்ச்சியில் இவ்வாற்றலும் முக்கியப் பங்கு வகிக்கிறது.

(ஈ) காந்தப் பரிமாணமாற்ற ஆற்றல் (Magnetostrictive energy):

காந்தமாக்கச்செறிவுத் திசையில் ஓர் இரும்பியல் பொருளின் நீளம் மாறுவதைக் காந்தப் பரிமாண மாற்றல் என்கிறோம். இக்காந்தப்பரிமாண மாற்றல் பெருங்கூறுகளில் எந்திரத்தகைவுகளை (mechanical stresses) உண்டாக்குகிறது. இதனால் ஏற்படக்கூடிய ஆற்றலைத்தான் காந்தப் பரிமாணமாற்ற ஆற்றல் என்கிறோம். குறிப்பாகக் காந்தப் பரிமாண மாற்றலை நிக்கலிலும் ஃபெரைட்டுகளிலும் காணலாம். அதனால், ஒரு நிக்கல் குழாய் அல்லது தண்டு (rod) வெளிக்காந்தப் புலத்திற்கு இணையாய் அதன் நீளம் இருக்கும்போது அதன் நீளத்தில் சிறிது மாற்றம் ஏற்படுகிறது. இந்த நீள மாற்றம் அப்பொருளைச் சார்ந்ததேயன்றிக் காந்தப்புலத்தின் திசையைச் சார்ந்ததில்லை. வெளிக்காந்தப் புலத்தில் ஒருபொருளின் நீளம் கூடுதல் அல்லது குறைதல் அப்பொருளின் குணத்தைப் பொருத்தது. நீளமாற்றம் சாதாரணமாய் ஒருமில்லியனில் ஒரு பாகமாகும். ஒருநிக்கல் தண்டினை மாறுதிசை காந்தப்புலத்திற்கிடத்தி, அதில் காந்தமாக்கச் செறிவை ஏற்படுத்தும்போது, மாறுதிசைக் காந்தப்புலத்தின் ஒவ்வொரு பாதி அலைவிற்கும் தண்டின் நீளம் குறைந்து, பின் தொடக்க நிலைக்கு வருகிறது. அதனால், அத்தண்டு மாறுதிசை மின்னோட்டத்தின் அதிர்வெண்ணைவிட இருமடங்கு அதிர்வெண்ணில் அதிர்கிறது. இங்ஙனம் இல்லாமல் முதலில் தண்டினைக் காந்தமாக்கிப் பின் மாறுதிசை மின்புலத்தில் இருக்குமாறு செய்தால் அதன் நீளம் மாறுதிசை மின்னோட்டத்தின் ஒவ்வொரு அலைவு

நேரக் காலஅளவில் மாறிப் பின் தொடக்க நிலைக்கு வருகிறது. அதனால், தண்டில் ஏற்படும் அதிர்வின் அதிர்வெண்ணும் மாறுதிசை மின்னோட்ட அதிர்வெண்ணும் சமமாயிருக்கும்போது ஒத்திசைவு அதிர்வுகள் ஏற்பட்டுத் தண்டு அதிக வீச்சில் அதிரும். இந்த ஒத்திசைவு அதிர்வின் அதிர்வெண் தண்டின் நீளத்தைப் பொறுத்தது. நீளம் குறைவாயிருந்தால் அதனுடைய ஒத்திசைவு அதிர்வெண் மிகுதியாயிருக்கும். ஆனால், குறைந்த நீளமுடைய தண்டைக்கொண்ட, காந்தப் பரிமாண மாற்ற அதிர்வி (vibrator) செய்வது மிகக் கடினம். மீயொலிகள் (ultrasonics) உருவாக்க இம்முறை பயன்படுத்தப்பட்டு வருகிறது. இதில் சற்று நீளமாகத் தண்டுகளைப் பயன்படுத்திக் குறைந்த அதிர்வெண் உள்ள மீயொலிகள் உருவாக்கப்படுகின்றன. மேலும், இத்தத்துவம், எந்திர வடிப்பான்களில் (mechanical filters) உள்ள எந்திர ஆற்றல் மாற்றிகளிலும் பயன்படுத்தப்பட்டு வருகிறது. எந்திர வடிப்பான்கள் ஒற்றைப்பக்கப்பட்டை ஒலிபரப்பில் (single side band transmission) மிகக் குறுகிய அதிர்வெண்பட்டை (narrow band) கிடைக்கப்பயன்படுகின்றன.

7.9 மீள் செயல் மற்றும் மீளாச் செயல் பெருங்கூறுகள் (Reversible and Irreversible Domains)



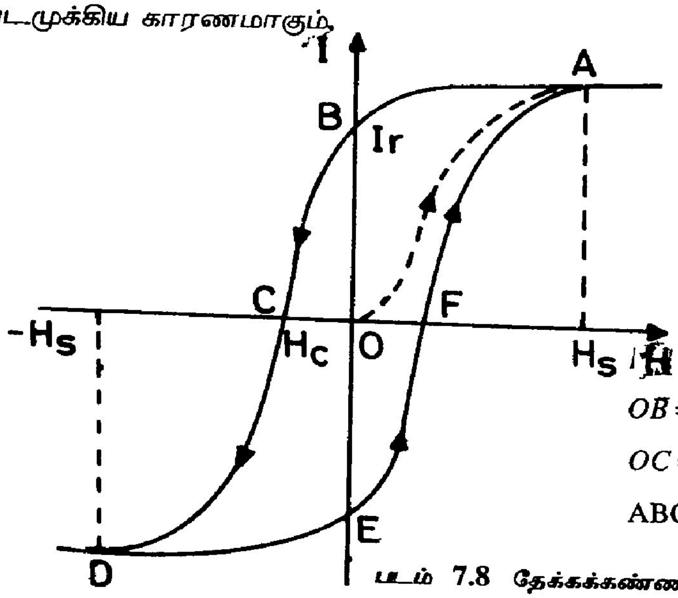
படம் 7.7 பெருங்கூறு சுவர்களின் ஆற்றல் வளைகோடு

ஓர் இரும்பியல் பொருளில் குறைந்தளவு வெளிக்காந்தப் புலத்தைச் செலுத்தினால் பெருங்கூறு சுவர், அதன் ஆற்றல் வளைகோட்டின் (energy curve) சிறுமத்திலிருந்து சிறிது இடம் பெயர்கிறது. ஆனால், வெளிக்காந்தப் புலத்தை நீக்கிவிட்டால் "பெருங்கூறு" சுவர் அதன் தொடக்க நிலைக்கு ஒருமாற்றமும் இல்லாமல் திரும்பி விடுகிறது. இம்மாதிரியான சுவர் இயக்கமுடைய பெருங்கூறுகள் '**மீள் செயல் பெருங்கூறுகள்** (reversible domains)' என்று கூறுவர். மிக அதிக அளவுள்ள வெளிக்காந்தப்புலத்தில் (external magnetic field) பெருங்கூறு சுவர் அதிக அளவில் இடம்பெயர்கிறது. அதனால் அதன் ஆற்றல்

வளைகோட்டின் பெருமத்தைக் கடந்து, பின் சிறுமப் பகுதியை நோக்கி வருகிறது (படம் 7.7). அதனால் வெளிக் காந்தப்புலத்தை நீக்கிவிட்டால் பெருங்கூறு சுவரால் பெருமத்தைக்கடக்க முடியாது ; அதன் தொடக்க நிலைக்கும் வர முடியாது. இம்மாதிரியான சுவர் இயக்கமுடைய பெருங்கூறுகள் **மீளாச் செயல் பெருங்கூறுகள்** (irreversible domains) என்று கூறுவர், ஒருபொருளில் தகைவுகள், உள்ளடங்கல்கள் (inclusions) யாதும் இல்லாதபோது மீள் செயல் சுவர் இயக்க அளவு அதிகமாயும், மேலும் குறைந்த அளவு வெளிக்காந்தப்புலம் இவ்வியக்கத்தைத் தோற்றுவிப்பதாயும் உள்ளன. அதனால், அப்பொருளில் மிகுந்த தொடக்கக் காந்த உட்புகு திறன் இருக்கும். இதனை **மென் காந்தப்பொருள்** என்பர். அதே சமயத்தில் அப்பொருளில் தகைவுகள், உள்ளடங்கல்கள் மிகுதியாயிருக்கும்போது சுவர் இயக்கம் உண்டாக, மிகுந்த அளவு வெளிக்காந்தப்புலம் தேவைப்படுகிறது. மேலும் சுவரின் இயக்கம் குறைவாயும், மீளாச்செயலைக் கொண்டதாயும் உள்ளது. எனவே இதனைக் **கடின காந்தப் பொருள்** என்பர் இதற்குக் காந்த நீக்கு விசை (cóercive force) மிகுதியாயிருக்கும்.

7.10 **தேக்க விளைவு** (Hysteresis effect)

ஓர் இரும்பியல் பொருளின் காந்தமாக்கச் செறிவு எப்போதும் காந்தப் புலத்திற்குப்பின் தங்குவதால் இது காந்தத் தேக்கம் (hysteresis) என்று வழங்கப்படும். இரும்பியல் பொருளில் ஏற்படும் மீளாச் செயல் $I-H$ பண்புகளே காந்தத் தேக்க விளைவு ஏற்படமுக்கிய காரணமாகும்.



படம் 7.8 தேக்கக்கண்ணி

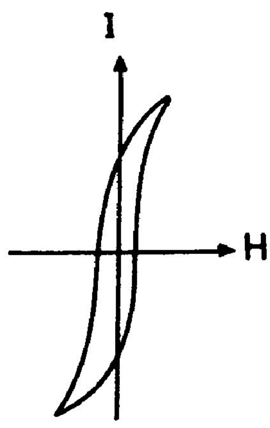
H_s = தெவிட்டு காந்தமாக்கும் புலம்
$OB = I_r$ = மீந்த காந்தச் செறிவு
$OC = H_C$ = காந்த நீக்கு விசை
ABCDEFA = தேக்கக்கண்ணி

படம் 7.8 இல் உள்ள ABCDEFA என்னும் தேக்கக்கண்ணி (hysteresis loop)யை பின்வருமாறு வரையலாம். பொருளில் காந்தமாக்கச் செறிவை ஏற்படுத்தும் காந்தப்புலத்தைச் சீராய் மிகச் செய்து, அவ்வப்பொழுது பொருளில் ஏற்படும் காந்தமாக்கச் செறிவினை அல்லது காந்தத் தூண்டல் அளவினை கணக்கிட்டு அவற்றின் அளவுகளை ஒரு வரைபடத்தின்மூலம் குறிக்கலாம். காந்தப் புலத்தை நேர்க்குறியுடைய தெவிட்டிய,

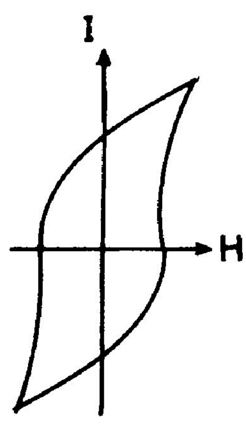
காந்தப்புலம் $(+H_s)$ வரை செலுத்தி, பின் எதிர்க்குறியுடைய தெவிட்டிய வெளிக்காந்தப்புலம்$(-H_s)$வரை படிப்படியாய்க் குறைத்துப்பின் $-H_s$ லிருந்து $+H_s$ வரை படிப்படியாகக் கூட்டிக்கொண்டே போனால் நமக்குக் கிடைப்பது ABCDEFA என்னும் தேக்கக் கண்ணியாகும். $+H_s$, $-H_s$ கிடைக்க வெளிக்காந்தப் புலத்திற்குச் செலுத்தப்படும் மின்னோட்டத்தின் திசையை மாற்றியமைக்க வேண்டும். படத்திலுள்ள ABCDEFA பகுதிக்குள் அடங்கியிருக்கும் பரப்பு ஒரு சுற்றில் (cycle) ஓர் இரும்பியல் பொருளைக் காந்தமேற்றுவதாலேற்படும் ஆற்றலிழப்பாகும். இதனையே '**தேக்க விளைவு ஆற்றலிழப்பு** (hysteresis loss)' என்பர். மேலும், படத்தில் காந்தமாக்கும் புலம் 'H' சுழியாகும்போது பொருளின் காந்தமாக்கச் செறிவு சுழியாய் மாறுவதில்லை. அதற்கு எதிர்மாறாய் OB என்னும் அளவு காந்தத் தன்மையுடையதாய் இருக்கிறது. இது **மீந்தக் காந்தத் தன்மை** (residual magnetism) அல்லது '**தேக்குத்திறன்** (retentivity)' எனப்படும். அஃதாவது, ஒருகாந்தமாக்கும் புலம் தெவிட்டிய நிலையிலிருந்து சுழியாய் மாறும்போது இரும்பியல் பொருளில் தேங்கியுள்ள காந்தமாக்கச் செறிவினை அப்பொருளின் "தேக்குத்திறன்" என அழைப்பர். ஒருபொருளின் தேக்குத்திறன் மிகுதியாயிருந்தால், காந்தமாக்கும் புலம் சுழியாய் மாறினாலும்கூட அதிகமான காந்தமாக்கச்செறிவோ, காந்தத் தூண்டலோ அப்பொருளில் தேங்கியிருக்கும். அதேபோல் காந்தமாக்கும் புலம், OC என்ற அளவில் எதிர்திசையில் இருந்தால் மீந்தக்காந்தம் முழுவதும் நீக்கப்படுகிறது. அதனால் OC என்னும் காந்தப்புலம் அப்பொருளின் '**காந்த நீக்குவிசை** (coercive force)' அல்லது '**காந்த நீக்குத்திறன்** (coercivity)' எனப்படும்.

7.11 தேக்கக்கண்ணியின் பயன்கள்

காந்தப் பொருள்களின் $I-H$ கண்ணியின் அமைப்பிலிருந்து அப்பொருளின் காந்தப் பண்புகளை அறியலாம்.



(அ) மென் இரும்பு



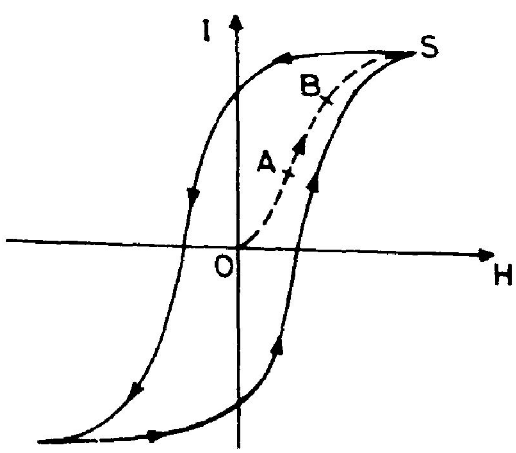
(ஆ) எஃகு

படம் 7.9 மென் இரும்பு, எஃகு ஆகியவற்றின் தேக்கக் கண்ணிகள்

படம் 7.9 இல் மென் இரும்பு (soft iron), எஃகு (steel) ஆகியவற்றுக்குரிய $I-H$ கண்ணிகள் (loops) கொடுக்கப்பட்டுள்ளன. இப்படத்திலிருந்து கீழ்க்காணும் உண்மைகளைத் தெரிந்து கொள்ளலாம்.

1. எஃகிற்குத் தேக்கக் கண்ணியின் பரப்பு மென் இரும்பிற்கு இருக்கும் கண்ணியின் பரப்பினை விட மிகுதி. அதனால், தேக்கக் கண்ணியால் ஏற்படும் ஆற்றலிழப்பு எஃகுவிற்கு மென் இரும்பினை விட அதிகம்.
2. மென் இரும்பின் தேக்கக் கண்ணி கூர்மையாய் (steep) இருப்பதால் மென் இரும்பினை வேகமாகக் காந்தமாக்கிவிடலாம். மேலும், மென் இரும்பிற்குத் தெவிட்டுக் காந்தமாக்கும் புலம் எஃகினை விடக்குறைவு.
3. காந்தமாக்கும் புலனைத் தெவிட்டிய மதிப்பிலிருந்து சுழியாக்கும் போது பொருளின்கண் உள்ள மீந்த காந்தத் தன்மை எஃகினை விட மென் இரும்பில் மிகக்குறைவு.
4. எஃகினைவிட மென் இரும்பிற்குக் காந்தநீக்குவிசை மிகக் குறைவாய்த் தேவைப்படும். அதனால், மென் இரும்பு மின்காந்தம் செய்யப் பயன்படுகிறது. ஏனெனில், மின்காந்தத்தின் உள்ளகத்திற்கு (core) ஏற்ற காந்தப் பொருள்கள் அதிக காந்தமாக்கச் செறிவு உடையதாயும், குறைந்த அளவு காந்தமாக்கும் புலத்தில் நிறைந்த காந்தமாக்கச் செறிவு உடையதாயும், குறைந்த காந்த நீக்குவிசை அல்லது காந்த நீக்குத்திறன் உடையதாயும், தேக்கக் கண்ணி ஆற்றலிழப்புக் குறைவாயும் இருக்க வேண்டும். மேலே கூறியப் பண்புகள் அனைத்தும் எஃகினைவிட மென் இரும்பு பெற்றிருப்பதால் மின்காந்தம் செய்ய மென் இரும்பு பயன்படுகிறது. ஆனால், எஃகு நிலையான காந்தம் செய்யப் பயன்படுகிறது. ஏனெனில், எளிதாக அதிலுள்ள காந்தத் தன்மையை நீக்கிவிட முடியாது.

7.12 பெருங்கூறு கொள்கையினால் தேக்கக் கண்ணிக்கு விளக்கம்



படம் 7.10 இரும்பியல் காந்தப்பொருளில் ஏற்படும் தேக்கக் கண்ணி

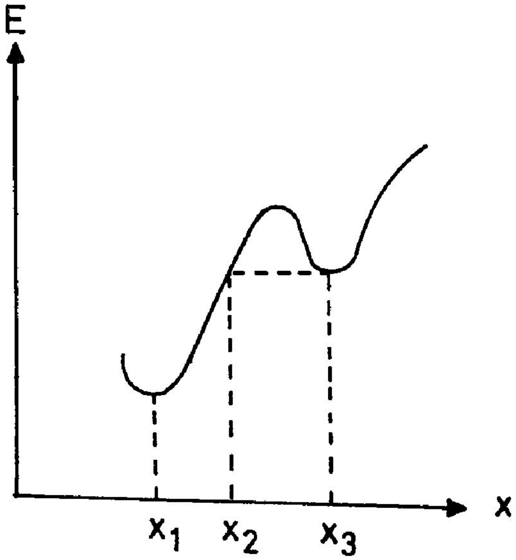
காந்தமாக்கும் புலனை இரும்பியல் பொருளிற் செலுத்தினால் இப்புலனுக்கு இணையாய் அல்லது சிறிது கோணத்தில் உள்ள காந்தத் திருப்புத் திறன் கொண்ட பெருங்கூறுகளின் பருமன் அல்லது கனஅளவு, இணையில்லாக் காந்தத் திருப்புத் திறன் கொண்ட பெருங்கூறுகளின் கனஅளவைக் குறைப்பதனால் அதிகமாகிறது. இதனால், பெருங்கூறுகளின் எல்லைக்கோடு இடம் பெயர்கிறது.

காந்தமேற்றலில் இதுவரை பங்கெடுக்காத ஒரு சுத்தமான கன்னித்தன்மை (virgin) மிக்க இரும்பியல் பொருளை எடுத்துக்கொள்வோம். தொடக்க நிலையில் (OA) பொருளில் ஏற்படும் காந்தமாக்கச் செறிவு சிறிய மீள் செயல் பெருங்கூறு சுவர் இடப்பெயர்ச்சியால் உண்டாகிறது. ஆனால் படம் 7.10 இல் உள்ள கூர்மையான AB என்ற பாகம், மிகுந்த மீளாச் செயல் பெருங்கூறு சுவர் இடப்பெயர்ச்சியால் ஏற்படுகிறது. காந்தச் செறிவின் வளைகோட்டின் மேற்பாகமான 'BS' காந்தமாக்கும் புலனின் திசைக்கு இணையாய் வரப் பெருங்கூறு சுழல்வதால் கிடைக்கிறது. இம்முறையானது கடினமானது. மேலும், இதனால், பொருளில் கூடும் காந்தமாக்கச்செறிவும் குறைந்த மதிப்புடையது. பின் காந்தமாக்கும் புலன் அதன் தெவிட்டிய மதிப்பினை அடைகிறது. காந்தமாக்கும் புலனை அதன் தெவிட்டிய மதிப்பிலிருந்து சிறிது சிறிதாய்க் குறைத்தால் பெருங்கூறுகளின் அமைப்பில் சிறிதளவு மாற்றம் உண்டாகிறது. ஏனெனில், அவைகளின் அமைப்பினை மாற்ற அவை நன்கு சுழற்சி அடையவேண்டும். மேலும், காந்தமாக்கச் செறிவும் மிகுதியாய் மீந்திருக்கிறது. காந்தமாக்கும் புலம் சுழியாய் மாறும்பொழுது நமக்குப் பெருங்கூறுகளின் தொடக்க நிலை அமைப்பு கிடைப்பதில்லை. மேலும், பொருளில் சிறிதளவு காந்தமாக்கச்செறிவு மீந்துள்ளது. இதனை அழிக்க நாம் காந்தமாக்கும் புலனை எதிர்திசையிற் செலுத்த வேண்டும். இவ்வாறு இரும்பியல் பொருளில் தேக்க விளைவு அல்லது தயக்க விளைவு மீள்செயல், மீளாச்செயல் பெருங்கூறு சுவர் இடப்பெயர்ச்சிகளினால் வருகிறது.

7.13 *பார்க்கூசன் விளைவு* (Barkhausen effect)

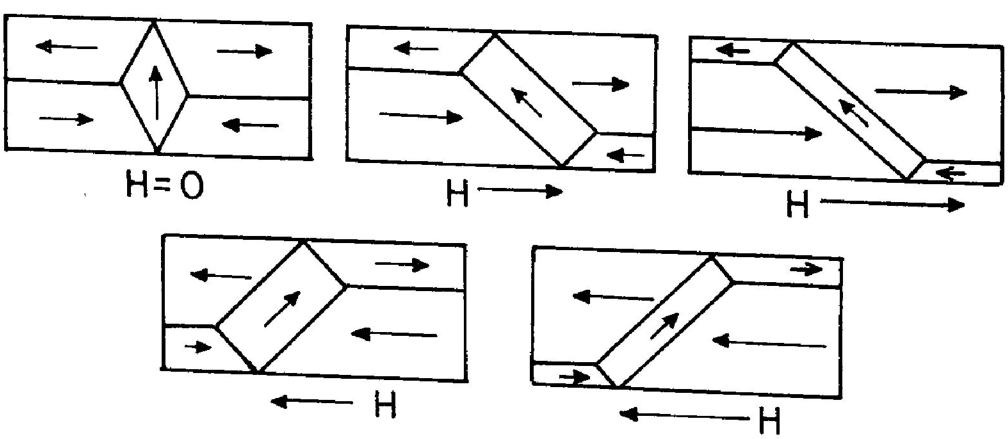
பெருங்கூறு சுவர்களின் ஆற்றல், சுவர்கள் இருக்கும் இடத்திற்கு ஏற்ப மாறுபடுகிறது. இந்த ஆற்றல் மாறுபாட்டால் சுவர் இயக்கத்திற்குச் சிறிது எதிர்ப்புக் கிடைக்கிறது. இதனையே வேறுவிதமாயும் கூறலாம். வெளிக்காந்தப்புலம் செலுத்தப்படும்பொழுது பெருங்கூறு சுவரில் தோன்றும் அழுத்தத்திற்கு எதிராய் ஒருவிசை தோன்றிச் சுவரின் இயக்கத்திற்குச் சிறிது தடை ஏற்படுத்தும். இதனையே பார்க்கூசன் விளைவு என்பர். படம் 7.11 இல் காட்டியவாறு பெருங்கூறு சுவர்களின் ஆற்றல், அவையிருக்கும் இடத்திற்கு ஏற்ப மாறுபடுகின்றன. தொடக்க நிலையில் ஒருபெருங்கூறு சுவர் x_1 என்ற அகட்டில் (trough) இருப்பதாய்க் கொள்வோம். வெளிக்காந்தப் புலத்தினால் அச்சுவர் மேல்நோக்கி ஒரு மாறுமுனை (point of inflection) 'x_2' வரும் வரை தள்ளப்படுகிறது. இந்த இடப்பெயர்ச்சிக்குப் பின்னால் அச்சுவர் x_3 வரை சுதந்திரமாய், அதே காந்தப் புலத்தில் இடப்பெயர்ச்சி செய்யும். ஏனெனில் ஆற்றல் வரையின் சாய்வு (slope) $\partial E/\partial x$ இன் மதிப்பு x_2, x_3 ஆகியவற்றில் சமமாயிருக்கும். இதனையேப் பார்க்கூசன் விளைவு என்கிறோம். ஒரு முழுமையான படிகத்தில் இம்மாதிரியான ஆற்றல் வேறுபாடுகள்

இல்லை. அதனால் அதன் காந்த ஏற்புத்திறன் அளவில்லா மதிப்பில் இருக்கும். ஆனால், சாதாரணமாய் மெய்மைப் படிகத்தில் குறைகள் இருப்பதால் குறிப்பிட்ட அளவு அப்படிகத்திற்குக் காந்த நீக்குந்திறன் இருக்கும். அதனால் அதன் காந்த ஏற்புத்திறனும் ஒரு குறிப்பிட்ட அளவே இருக்கும்.



படம் 7.11 பார்க்கூசன் விளைவு ஏற்படும் விதம்

7.14 பிட்டர் தூள் படிவங்கள் (Bitter powder patterns)



படம் 7.12 பிட்டர் தூள் படிவங்கள்

1931 - இல் பிட்டர் தூள் படிவங்கள் மூலம் பெருங்கூறின் வடிவமைப்புகள் கண்டுபிடிக்கப்பட்டன. இரும்பியல் பொருள்களில் பெருங்கூறு அமைப்பு உள்ளது என்பதற்குப் பிட்டர் தூள் படிவங்களே சான்றுகளாகும். இது சோதனை முறையாலும் நிரூபிக்கப்பட்ட ஒன்றாகும். மேலேயுள்ள படங்கள் (படம் 7.12) நுண்ணொளிப் படங்களாகும் (microphotographs). அப்படங்கள் பெருங்கூறு சுவர்களின் எல்லைக் கோடுகளைத் துல்லியமாகக் காட்டுகின்றன. இப்படங்கள் பிட்டர் முறையில் (Bitter technique) கிடைக்கப்பட்டவையாகும். மேலும், இப்படங்கள் இரும்பு ஒற்றைப் படிகங்களில் (single crystals) வெளிக்காந்தப்புலம் செலுத்தப்படும் பொழுது பெருங்கூறுகள் எவ்வாறு வளர்ச்சி அடைகின்றன என்பதையும் காட்டுகின்றன. இம்முறையில் இரும்பு படிகத்தின் மீது நன்கு தூள் படுத்தப்பட்ட (finely divided) கூழ்நிலையிலுள்ள இரும்பு ஆக்ஸைடைத் திண்குழைம (colloidal) வடிவில் சிறிது பரவவிட்டு, பின் நுண்ணோக்கி வழியாய், கூழ்த்துணுக்குகள் பெருங்கூறு எல்லைக்கோடுகளில் மிகுதியாய்ச் சேகரிக்கப்பெற்றிருப்பதைக் காணலாம். ஏனெனில், மிகுந்த ஆற்றலுள்ள உட்காந்தப்புலம்கள் பெருங்கூறு எல்லைக் கோடுகளில் உள்ளன. அதனால், இவை கூழ்த்துணுக்குகளைத் தம்மை நோக்கிக் கவர்கின்றன. மேலும், வெளிக்காந்தப்புலம் சிறிது சிறிதாகக் கூடும்பொழுது வெளிக்காந்தப்புலத்தின் திசைக்கு இணையாய்க் காந்தத் திருப்புத்திறன் உள்ள பெருங்கூறுகளின் கனஅளவு விரிவடைவதையும் நுண்ணோக்கி மூலம் பார்க்கலாம். வெளிக்காந்தப்புலத்தின் வெவ்வேறு மதிப்புகளின் போது பெருங்கூறுகளின் அமைப்பு எங்ஙனம் மாறுகின்றன என்பதைத் தெளிவாக்க நுண்ணோக்கியின் துணை கொண்டு எடுக்கப்பட்ட நுண்ணொளிப் படங்களைப் படம் 7.12 நமக்குக் காட்டுகிறது.

7.15 மென், கடின காந்தப்பொருள்கள் (soft and hard magnetic materials)

(அ) மென் காந்தப்பொருள்கள் :

மிகுந்த காந்த உட்புகுதிறனும், குறைந்த தேக்கவிளைவு ஆற்றலிழப்பு உடையதும், குறைந்த சுழி மின்னோட்ட (eddy current) ஆற்றலிழப்பு உடையதுமான காந்தப் பொருள்களை மென் காந்தப் பொருள்கள் என்கிறோம். இவ்வகைப் பொருள்களை எளிதாய்க் காந்தமாக்கவும், எளிதாய்க் காந்தமிழக்கவும் செய்ய முடியும். மென் காந்தப்பொருள் கிடைக்க அதிலுள்ள பெருங்கூறு சுவர்கள் எளிதாய் இடப்பெயர்ச்சி செய்யும்படியாயும், மீள் செயல் பெருங்கூறுகளை உடையதாயும் இருக்கவேண்டும். இதனால் காந்தமாக்கும் புலம் சிறிது மாறினாலும் இவ்வகைப் பொருள்களில் காந்தமாக்கச் செறிவில் மிகுதியான மாற்றம் உண்டாகும். மேலும், காந்த நீக்குந்திறனும் மிகக் குறைவாயிருக்கும். இப்பண்புகள் கிடைக்கப்பொருளின் படிக அமைப்பில் குறைபாடு ஏதும் இருக்கக் கூடாது. அஃதாவது, அதில் திரிபோ, வேற்றுப்பொருள் துணுக்குகளோ இருக்கக்கூடாது. அதனால் இப்பொருள்களை உற்பத்தி செய்யும் பொழுது பொருளை ஒருகுறிப்பிட்ட வெப்பநிலை வரை வெப்பப்படுத்தி, அதிலுள்ள அணுக்கள் சீரான அணுக்கோவைப் புள்ளியில் சரியாய் அமரும்படி செய்து பின் அதன் அமைப்பில் ஏதேனும் மாறுதல் நிகழாதவாறு அப்பொருள் மெல்ல ஆறவிடப்படுகிறது. இம்முறையை **ஆற்றிப் பதனிடுதல்** (annealing) என்பர்.

உதாரணங்களும், பயன்களும்:

பொதுவாய் மென்காந்தப் பொருள்கள் மின் காந்தங்களிலும் மின்மாற்றியின் உள்ளகங்களிலும் பயன்படுத்தப்படுகின்றன. ஒரு மென் காந்தப்பொருள் நல்லதொரு மின்காந்தமாய் விளங்க, அதன் தொடக்கக் காந்த உட்புகுதிறன் மிக அதிகமாயும், காந்த நீக்கு விசை மற்றும் தேக்குத்திறன் மிகக் குறைவாயும் இருக்க வேண்டும். எனவே அதன் தேக்கக் கண்ணி நீண்டு, மெலிந்து, சிறுபரப்பு கொண்டதாய் இருத்தல் வேண்டும். மேலும் அதன் பெருங்கூறுகள் முற்றிலும் மீள் செயல் கொண்டதாய் இருக்க வேண்டும். இதேபோல் ஒரு மென்காந்தப் பொருள் மின் மாற்றியின் இழப்பு இல்லா நல்லதோர் உள்ளகமாய் விளங்கிட மேலே குறிப்பிட்ட பண்புகள் தேவை. மேலும் அதில் தயக்க இழப்புகள் மற்றும் சுழி மின்னோட்ட இழப்புகள் இருக்கக் கூடாது. தயக்க இழப்புகளைத் தவிர்க்க தேக்கக் கண்ணியின் பரப்பு ஏறக்குறையச் சுழியாய் இருக்க வேண்டும். ஒரு நிலையான (stationary) மின் கடத்தியில் மாறு நிலைக்காந்தப்புலம் செயல்படும் போது, அதன் மேற்பரப்பில் நீர்ச்சுழி (eddy) வடிவைக் கொண்ட ஒரு மின்னோட்டம் உருவாகிறது. இதைச் சுழி மின்னோட்டம் என்பர். இதன் காரணமாய்த் தோன்றும் ஆற்றலிழப்பிற்கு **சுழி மின்னோட்ட இழப்பு** என்பர். இச்சுழி மின்னோட்ட இழப்பு ஏற்படாமல் இருக்க உள்ளகப் பொருளின் மின் எதிர்ப்புத்திறன் மிகுதியாய் இருக்க வேண்டும். பெரும்பாலும் இரும்பியல் பொருள்கள் உலோகங்களாய் இருப்பதால், அவற்றின் மின் எதிர்ப்புத் திறன் குறைவாய் இருக்கும். எனவே உள்ளகப்பொருளின் மின் எதிர்ப்புத்திறனை அதிகரிக்க, அதன் அணிக்கோவையில் குலைவு ஏற்படாமல் சீரான முறையில் வேற்றுப் பொருள்கள் அதனோடு கலக்கப்படுகின்றன. மேலும் உள்ளகத்தைச் சிறு, சிறு தகடுகளாக்கி அவற்றினிடையே மின் கடத்தாப் பூச்சுகள் செய்து, அழுத்தி, ஒரே திண்மமாய் உருவாக்குவதால் அதன் மின் எதிர்ப்புத் திறன் மேலும் அதிகரிக்கிறது.

(1) **இரும்பு–சிலிக்கான்** (Fe- Si) **உலோகக்கலவை** (Alloy):

இதன் மின் எதிர்ப்புத்திறன் சுத்தமான இரும்பினை விட அதிகம். ஏனெனில், நான்கு விழுக்காடுகள் மதிப்புள்ள சிலிக்கான் சேர்க்கப்பட்டுள்ளது. இதன் காரணமாய் இவற்றில் சுழிமின்னோட்டத் திறன் இழப்பும், மின்மாற்றி உள்ளக திறனிழப்பும் குறைகின்றன. இவ்வித உலோகக்கலவைகள், திறன் அதிர்வெண்களாய 50-60 ஹெர்ட்ஸ்களில் செயல்படுத்தத் தகுதிவாய்ந்தனவாகும். ஆனால் மிகுதியான உணர்திறன் (sensitivity), முற்றிசைவு (fidelity) கிடைக்க இவை ஏற்றன அல்ல.

(2) **இரும்பு - நிக்கல்** (Fe-Ni) **உலோகக்கலவை** :

இவ்வகை உலோகக்கலவைகள் செவியுணர் அதிர்வெண்கள் (audio frequencies) வரை செயல்படுத்தத் தகுதிவாய்ந்தனவாகும். மேலும், காந்த மென்மையாக்கல் (magnetic annealing) முறையில் சுழிமின்னோட்டத் திறனிழப்பு மேலும் குறைக்கப்பட்டு, உணர்திறன், முற்றிசைவு போன்ற பண்புகள் மிகுதியாக்கப்பட்டுள்ளன. அதனால், இப்பொருள்கள் செய்தித் தொடர்புக் கருவிகளில் பெர்ம் உலோகக்கலவை (permalloy) (45% நிக்கல் + 55% இரும்பு), சூப்பர்ம் உலோகக்கலவை (supermalloy) (79% நிக்கல் + 5% மாலிபிடினியம் + 16% இரும்பு) என்னும் பெயர்களில் பயன்படுத்தப்படுகின்றன.

மேலும், இரும்பு - சிலிக்கான் உலோகக் கலவையைவிட இரும்பு - நிக்கல் உலோகக் கலவையில் தொடக்கக் காந்த உட்புகுதிறன் மிகுதியாயுள்ளது. அதனால், தேக்கக் கண்ணியின் பரப்புக் குறைவதுடன் அப்பொருள்களை உயர் அதிர்வெண்களில் பயன்படுத்த வழிவகை செய்கிறது.

(3) **ஃபெரைட்டுகளும், கார்னெட்டுகளும்** (ferrites and garnets):

உயர்ந்த அதிர்வெண்களில் செயற்படும் மின்மாற்றிகளை உருவாக்க ஃபெரைட்டுகளும், மீஉயர் அதிர்வெண்களில் செயற்படக் கார்னெட்களும் பயன்படுகின்றன. முன்கூறிய இரும்பு - சிலிக்கான் உலோகக்கலவை, இரும்பு - நிக்கல் உலோகக்கலவை ஆகியவற்றை உயர் அதிர்வெண்களில் பயன்படுத்த முடியாது. ஏனெனில், அந்த அதிர்வெண்களில் இப்பொருள்களில் சுழி மின்னோட்ட திறனிழப்பு மிகுதியாயுள்ளது. அதனால் ஃபெரைட்டுகளும், கார்னெட்டுகளும் பயன்படுத்தப்படுகின்றன. இவ்வகை உலோகக் கலவைகளில் மின்எதிர்ப்புத்திறன் மிக மிக அதிகம். அதனால் இவற்றிற்குச் சுழிமின்னோட்டத் திறனிழப்பு மிகவும் குறைவு. நிக்கல் - துத்தநாக ஃபெரைட்டுகள் செவியுணர் அதிர்வெண்களில் செயற்படும் மின்மாற்றிகளிலும் தொலைக்காட்சி மின்மாற்றிகளிலும் பயன்படுகின்றன. மக்னீசியம் - மாங்கனீசு ஃபெரைட்டுகள் மிக அதிக மின்எதிர்ப்புத் திறனுடையன. அதனால், அவை நுண்ணலை (microwave) அதிர்வெண்களிலும், உயர் அதிர்வெண்களிலும் செயல்படுகின்றன. முக்கியமாய் அவை நுண்ணலை தனியாக்கிகளில் (microwave isolators) பயன்படுகின்றன. ஃபெரைட்டுகளில் காந்தப்பரிமாணமாற்ற விளைவு மிகுதியாய் உள்ளது. அதனால், அவை மின்எந்திர ஆற்றல்மாற்றிகளில் (electromechanical transducers) பயன்படுகின்றன. மின் காந்தங்கள் அனைத்தும் மென் காந்தப் பொருள்களில் தயாராகின்றன.

(4) **இரும்பியல் கனசதுரம்** (Ferrous cube):

இரும்பியல் கனசதுரம் என்பது ஒரு மென்காந்தப் பொருளாகும். மேலும் அஃது ஒரு ஃபெரைட்டும் ஆகும். அதனுடைய தேக்கக் கண்ணி சதுரவடிவில் இருக்கும். அதற்கு மிக அதிகமான மின்எதிர்ப்புத் திறனும். அதிகமான காந்த ஏற்புத்திறனும் உண்டு. இது கணிப்பொறியின் (computer) நினைவு உள்ளகங்களிலும் (memory cores), இணைப்புச் சுற்றுகளிலும் (switching circuits), நகர்வு பதிவுகளிலும் (shift registers) பயன்படுத்தப்படுகின்றன. இவற்றில் மக்னீசிய ஆக்ஸைடும், மாங்கனீசு ஆக்ஸைடும் சம அளவில் கலக்கப்பட்டுள்ளன.

உதாரணம்: மக்னீசிய - மாங்கனீசு ஆக்ஸைடு ஃபெரைட்டு

$$[(50\%\ MgO + 50\%\ MnO) - Fe_2O_3]$$

(ஆ) கடின காந்தப் பொருள்கள்:

கடின காந்தப் பொருள்களில் தேக்கவிளைவு ஆற்றலிழப்பும், சுழிமின்னோட்ட ஆற்றலிழப்பும், காந்த நிலை ஆற்றலும் அதிகமாயிருக்கும். இவற்றை எளிதாகக் காந்தமாக்கவோ, காந்தமிழக்கச் செய்யவோ முடியாது. அதனால் இவற்றில் காந்த நீக்குந்திறன் அதிகமாயிருக்கும். மேலும், பொருளின் காந்த ஏற்புத்திறன் மிகக்

குறைவாயிருக்கும். பொருளின் அணிக்கோவையில் உள்ள குறைபாடுகளால் பெருங்கூறு சுவரின் இடப்பெயர்ச்சி கடினமாயிருக்கும். மேலும் பெருங்கூறு சுவரின் இடப்பெயர்ச்சி மீளாச்செயலுடையதாய் இருக்கும். இப்பொருள்களை வெப்பப்படுத்தி வேகமாகக் குளிரப்படுத்தல் முறையில் (quenching), உட்தகைவுகள் (internal stresses) ஏற்படுத்தப்படுகின்றன. அதனால், அவற்றின் அணிக்கோவைகளில் குறைபாடுகள் தோன்றிக் கடின காந்தப் பொருள்களாகின்றன.

உதாரணங்களும் பயன்களும்:

(1) *அல்நிக்கோ* (Alnico):

அல்நிக்கோ உலோகக் கலவைக்கு, வெப்பப்பதனிடல் (heat treatment) ஒருகாந்தப் புலத்தில் செய்யப்படுவதால் அதன் காந்த நிலைஆற்றல் கூடுகிறது. இதில் அலுமினியம் 10%, நிக்கல் 18%, கோபால்ட் 12%, தாமிரம் 6%, இரும்பு 54% உள்ளன. இவ்வுலோகக் கலவையில் மேலும் கோபால்ட் விழுக்காடுகளைக் கூட்டி, நிக்கல் விழுக்காடுகளைக் குறைத்து, அல்நிக்கோ V, அல்நிக்கோ II என்கிற உலோகக்கலவைகள் தயாரிக்கப்படுகின்றன. அல்நிக்கோ II-ல் காந்த நீக்குவிசையும், மீந்தக் காந்தச் செறிவும் மிகுதியாயுள்ளன.

(2) நிலைக் காந்தங்களுக்கு எஃகு மிகுதியாகப் பயன்படுத்தப்படுகிறது. ஏனெனில், அதில் மிகுதியாய் மீந்தக் காந்தமும். மிகுதியானக் காந்த நிலைஆற்றலும் உள்ளன. நிலைக்காந்தங்கள் சுத்தமான இரும்பினைக் கொண்டு வெப்பப்பதனிடல் மூலம் ஒரேயொரு பெருங்கூறு இருக்குமாறும். மிகுந்த காந்த நிலைஆற்றல் இருக்குமாறும் செய்யப்படுகின்றன. மேலும், அவை இரும்பு, கோபால்ட் தூள்களை ஒரு வெளிக்காந்தப்புலத்தில் கெட்டிப்படுத்தியும் உற்பத்தி செய்யப்படுகின்றன.

7.16 ஃபெரைட்டுகளின் இயலமைப்பு (Structure of Ferrites):

ஃபெரைட்டுகள், ஃபெரிகாந்தப்பொருள்களுக்கு நல்ல உதாரணங்களாகும். இதில் அருகருகே உள்ள அயனிகளின் சுழற்சிகள் ஒருவெளிக் காந்தப்புலத்தில் எதிரெதிராயும், அவற்றின் காந்தத் திருப்புத்திறனின் மதிப்புச் சமமாயில்லாமலும் இருக்கும். இவை பீங்கானாலான (Ceramic) இரும்பியல் கூட்டுப் பொருள்களாகும். இவற்றின் பொதுவான சூத்திரம் "XFe_2O_4" ஆகும். இதில் X என்பது மாங்கனீசு, மக்னீசியம், துத்தநாகம் போன்ற ஏதாவது ஓர் உலோகத்தைக் குறிக்கும். இவற்றில் மிகுந்த மின் எதிர்ப்புத்திறனும், குறைந்த சுழிமின்னோட்ட ஆற்றலிழப்பும் இருக்கும். ஃபெரைட்டுகளில் இருவிதமான உள்ளமைப்புகள் உள்ளன. அவை சீரான ஸ்பைனெல் (regular spinel), தலைகீழ் ஸ்பைனெல் (inverse spinel) ஆகும்.

(i) *சீரான ஸ்பைனெல்:*

இதில் எதிர்மின் ஆக்ஸிஜன் அயனிகள் நெருக்கப் பொதிவில் (closest packing) முகமையக் கனசதுர இயலமைப்பில் அமையும். அணிக்கோவையிலுள்ள ஆக்ஸிஜன் அயனிகளுக்கு இடையில் இடைவெளிகள் உண்டு. அந்த இடைவெளிகளில் சிறிய உலோக

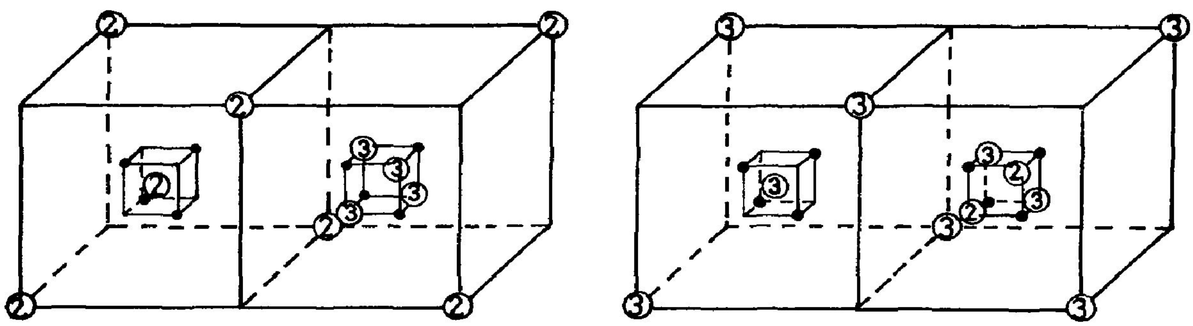
அயனிகளை அமர்த்த முடியும். இவ்வகை இடைவெளிகள் இருவகைப்படும். பொருத்தப்பட்ட ஓர் உலோக அயனிக்கு மிக அருகில் சம தொலைவில் '6' ஆக்ஸிஜன் அயனிகள் இருந்தால் அந்த உலோக அயனி உள்ள இடத்தை எண்முக இடம் (octehedral site) என்பர். இதனை 'B' இடம் எனச் சுருக்கமாயும் அழைப்பர். இந்த ஆறு ஆக்ஸிஜன் அயனிகளும் கனசதுரத்தின் முகமையத்தில் அமையும். மேலும், கனசதுரத்தின் 12 விளிம்புகளின் நடுப்புள்ளிகளும் 'B' இடங்கள் ஆகும். ஆனால், இவை பக்கத்து அலகு செல்களாலும் பகிர்ந்து கொள்ளப்படும். அதனால், ஆக்ஸிஜனின் அலகு செல்லில் (unit cell) 16 எண்முக இடங்கள் உள. இதேபோல் ஓர் உலோக அயனிக்கு அருகில் 4 ஆக்ஸிஜன் அயனிகள் இருந்தால் அந்த உலோக அயனி உள்ள இடத்தை நான்முக இடம் (tetrahedral site) என்பர். அதனை, 'A' இடம் என்றும் கூறுவர். ஆக்ஸிஜனின் அலகு செல்லில் 8 நான்முக இடங்கள் உள.

சீரான ஸ்பைனெலில் ஆக்ஸிஜனின் முகமையக் கனசதுர இயலமைப்பில், மூன்று இணைதிறன் உள்ள உலோக அயனி ஒவ்வொன்றும் 'B' இடத்திலும், இருஇணைதிறன் உள்ள உலோக அயனி ஒவ்வொன்றும் 'A' இடத்திலும் அமர்ந்திருக்கின்றன.

சூத்திரம்: $X^{2+} Fe_2^{3+} O_4$

இதில் X என்பது இருஇணைதிறன் கொண்ட துத்தநாகம், மக்னீசியம், மாங்கனீஸ், தாமிரம், நிக்கல் போன்ற ஏதாவதோர் உலோக அயனியாகும். Fe என்பது மூன்று இணைதிறன் கொண்ட இரும்பு அயனி ஆகும்.

உதாரணம்: துத்தநாக ஃபெரைட் ($Zn\, Fe_2\, O_4$)



• – ஆக்ஸிஜன் அயனி இருப்பிடம்
② – இரு இணைதிற உலோக அயனி இருப்பிடம்
③ – மூன்று இணைதிற உலோக அயனி இருப்பிடம்

(அ) (ஆ)

படம் 7.13 (அ) சீரான ஸ்பெனெலின் இயலமைப்பு (ஆ) தலைகீழ் ஸ்பைனெலின் இயலமைப்பு

படம் 7.13 (அ)வில் காட்டப்பட்டுள்ள சீரான ஸ்பைனெலின் இயலமைப்பில் ② என்று ஒருசிறுவட்டத்திற்குள் போடப்பட்டிருக்கும் எண் இரு இணைதிறன் கொண்ட உலோக அயனியின் இருப்பிடத்தைக் குறிக்கிறது. அதன் நான்குபுறங்களிலும் நான்கு O^{2-} அல்லது

O^{--} அயனிகளால் சூழப்பட்டுள்ளன. இதனையே நான்முக இடம் என்கிறோம். இதேபோல் ③ என்று ஒருசிறுவட்டத்திற்குள் போடப்பட்டிருக்கும் எண் மூன்று இணைதிறன் கொண்ட உலோக அயனியின் இருப்பிடத்தைக் குறிக்கிறது. எண்ணைச்சுற்றிச் சமதொலைவில் ஆறு ஆக்ஸிஜன் அயனிகள் உள. இதனையே எண்முக இடம் என்கிறோம்.

(ii) தலைகீழ் ஸ்பைனெல்:

இதில் மூன்று இணைதிறனுடைய உலோக அயனிகள் ③ எல்லா நான்முக இடங்களிலும் (A இடங்கள்), பாதி எண்முக இடங்களிலும் (B இடங்கள்) அமர்ந்துள்ளன. மீதி உள்ள 'B' இடங்களில் இருஇணைதிறனுடைய உலோக அயனிகள் ② அமர்ந்துள்ளன (படம் 7.13 (ஆ)).

சூத்திரம்: $Fe\,(XFe)\,O_4$

உதாரணம்: மேக்னடைட் அல்லது இரும்பு ஃபெரைட்

அஃதாவது $Fe_3\,O_4 = Fe^{3+}\,(Fe^{2+}\,Fe^{3+})\,O^4$

7.17 ஃபெரைட்டுகளில் காணப்படும் பரிமாற்று விசைகளின் வகைகள்

நீலின் கூற்றுப்படி ஃபெரைட்டுகளில் காணப்படும் பரிமாற்று விசைகள் அனைத்தும் அல்லிரும்பியலில் காணப்படும் பரிமாற்று விசையின் குணத்தை ஒத்திருக்கின்றன, மேலும் A - Bக்கு இடையில் காணப்படும் பரிமாற்றுவிசை, A - Aக்கு இடையிலும், B - Bக்கு இடையிலும் காணப்படும் பரிமாற்றுவிசைகளைவிடச் சற்று ஆற்றல் வாய்ந்தது. குறிப்பாய் நிக்கல் ஃபெரைட்டை இரும்பியல் பொருளாய் எடுத்துக்கொண்டால் அதில் 12 போர் மேக்னாட்டான்கள் இருக்க வேண்டும். அஃதாவது, 7 போர் மேக்னாட்டான்கள் 'B' இடத்திலும், 5 போர் மேக்னாட்டான்கள் 'A' இடத்திலும் இருக்க வேண்டும். ஏனெனில், நிக்கல் ஃபெரைட் தலைகீழ் ஸ்பைனெல் இயலமைப்பை உடையது. அதில் 'A' இடத்தில் மூன்று இணைதிறன் கொண்ட அயனிகளும், 'B' இடத்தில் மூன்று இணைதிறன் கொண்ட இரும்பு அயனிகளும், இருஇணைதிறன் கொண்ட நிக்கல் அயனிகளும் உள. (B இடத்தில் 2 போர் மேக்னாட்டான்கள் மிகுதியாயிருப்பதற்குக் காரணம் நிக்கல் அயனிகள் கூடுதலாய் அங்கு இருப்பதேயாகும்). ஆனால் பரிசோதனையின் மூலம் நிக்கல் ஃபெரைட்டில் நமக்கு கிடைப்பது 2.3 போர் மேக்னாட்டான்கள் ஆகும். அதனால், நீலின் கூற்றுப்படி ஃபெரைட்டுகளின் பரிமாற்று விசை அல்லிரும்பியல் குணத்தை அவற்றில் ஏற்படுத்துகிறது என்று எடுத்துக்கொண்டால் ஒருமூலக்கூறில் உள்ள மொத்தக் காந்தத்திருப்புத் திறனின் மதிப்பு 'B' இடங்களில் உள்ள 7 போர் மேக்னாட்டான்களுக்கும் 'A' இடங்களில் உள்ள 5 போர் மேக்னாட்டான்களும் உள்ள வேறுபாடு ஆகும். அஃதாவது, $7 - 5 = 2$ போர் மேக்னாட்டான்களாகும். இது பரிசோதனை மதிப்பிற்கு (2.3) மிக அருகில் உள்ளது. எனவே நிக்கல் ஃபெரைட் ஒரு ஃபெரிகாந்தப் பொருளாகும். துத்தநாக ஃபெரைட்டை ($Zn\,Fe_2\,O_4$) எடுத்துக்கொண்டால் அது சீரான ஸ்பைனெல் இயலமைப்பைக் கொண்டதாகும். அதில் 'A' இடங்கள்

அனைத்தும் காந்தத் தன்மையில்லாத துத்தநாக அயனிகளாலும், 'B' இடங்கள் அனைத்தும் மூன்று இணைதிறன் கொண்ட இரும்பு அயனிகளாலும் நிரப்பப்பட்டு இருக்கும். A இடத்தில் காந்தத் திருப்புத்திறன் ஏதும் இல்லையாதலால் A - Bக்கு இடையில் ஏற்படும் பரிமாற்றுவிசையின் மதிப்புச் சுழியாகும். 'B' இடங்களிலிருக்கும் இரும்பு அயனிகளின் சுழற்சி இணைப்பெறுமை எதிரிணையாயிருக்கும். அதனால் B - Bக்கு இடையில் ஏற்படும் பரிமாற்றுவிசை அல்லிரும்பியல் வகையை ஒத்து இருக்கும். B - Bக்கு இடையில் ஏற்படும் பரிமாற்று விசையின் மதிப்பும் சுழியாகும். A - Aக்கு இடையில் பரிமாற்று விசையே இராது. ஏனெனில், துத்தநாகம் காந்தப் பொருளாகாது. அதனால், துத்தநாகப் ஃபெரைட்டில் காந்தத் திருப்புத்திறன் மதிப்புச் சுழியாயிருக்கும் அதனால், அஃது ஓர் அல்லிரும்பியல் பொருளாகும்.

7.18 கார்னெட்டுகள் (Garnets)

கார்னெட்டுகள் ஃபெரிகாந்தப் பொருள்களாகும். இவை நுண்ணலைத் தனியாக்கிகளாகக் கிகாஹெர்ட்ஸ் அதிர்வெண்களில் பயன்படுகின்றன.

சூத்திரம்: $M_3\, Fe_5\, O_{12}$.

இதில் M என்பது மூன்று இணைதிறன் கொண்ட உலோக அயனியாகும். Fe என்பது மூன்று இணைதிறன் கொண்ட இரும்பு ஆகும்.

உதாரணம்:

$Y_3\, Fe_5\, O_{12} \rightarrow YIG$. அஃதாவது, இட்டிரியம் இரும்பு கார்னெட்டு.

மாதிரிக் கணக்குகள்:

1. உருவ மையக் கனசதுர இயலமைப்புடைய இரும்பின் தெவிட்டிய காந்தமாக்கச் செறிவு 1750000 ஆம்பியர்/மீ. அப்படிகத்தில் உள்ள ஓர் இரும்பு அணுவிலுள்ள மொத்தக் காந்தத் திருப்புத்திறனைக் கணக்கிடுக.

உருவமையக் கனசதுர இயலமைப்புடைய இரும்பின்

அணிக்கோவை மாறிலி	=	2.87 ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகள்
அதன் அலகு செல்லின் பருமன் 'V'	=	$(2.87)^3 \times 10^{-30}$ மீ^{3}
அலகு செல்லில் உள்ள மொத்த அணுக்கள் 'n'	=	2

ஓர் அணுவின் மொத்தக் காந்தத் திருப்புத்திறன்

$$'\mu' = \frac{\text{தெவிட்டிய காந்தமாக்கச்செறிவு } 'I_s'}{\text{ஓரலகு பருமனில் உள்ள அணுக்களின் எண்ணிக்கை } 'N'}$$

ஏனெனில் $N\mu = I_s$

ஓரலகு பருமனில் உள்ள இரும்பு அணுக்கள் $N = \frac{\text{அலகு செல்லின் மொத்த அணுக்கள்}}{\text{அலகு செல்லின் பருமன்}}$

$$\therefore \mu = \frac{I_s V}{n} = \frac{1750000 \times (2.87)^3 \times 10^{-30}}{2}$$

$$= 2.068 \times 10^{-23} \text{ ஆம்பியர்–மீ}^2$$

இதனையே போர் மேக்னாட்டான் அலகில் கூறலாம்.

1 போர் மேக்னாட்டான் $= 9.273 \times 10^{-24}$ ஆம்பியர்–மீ^{2}.

∴ ஓர் இரும்பு அணுவின் மொத்தக் காந்தத் திறப்புத்திறன்

$$= \frac{2.068 \times 10^{-23}}{9.273 \times 10^{-24}} = 2.2 \text{ போர் மேக்னாட்டான்.}$$

2. ஒருமின்மாற்றியின் உள்ளகத்தின் சுருளில் 50 ஹெர்ட்ஸ் அதிர்வெண் உள்ள மாறுதிசை மின்னோட்டம் பாய்கிறது. அதன் உள்ளகத்தின் கனஅளவு (0.01 மீ^{3}) முழுவதும் காந்தமாக்கச் செறிவு சீராயிருக்கிறது என்று எடுத்துக்கொண்டால் தேக்க விளைவு ஆற்றலிழப்பு எவ்வளவு? தேக்கக் கண்ணியின் பரப்பு 60000 அலகுகள். அதன் அச்சுகள் முறையே 10^{-4} வெபர்/மீ^{2}, 10^2 ஆம்பியர்/மீ என்ற அலகுகளில் எடுத்துக்கொள்ளப்பட்டன.

ஓரலகு பருமனுள்ள உள்ளகத்தில் ஒவ்வொரு முழுச்சுற்றுக் காந்தமேற்றுவதால் ஏற்படும் தேக்கவிளைவு ஆற்றலிழப்பு = தேக்கக் கண்ணியின் பரப்பு

$$= 10^{-4} \times 10^2 \times 60000 = 600 \text{ ஜூல்/மீ}^3$$

மின்மாற்றியின் உள்ளகப்பருமன் $= 0.01$ மீ^{3}

∴ கொடுக்கப்பட்ட உள்ளகத்தில் ஒவ்வொரு சுற்றிலும் (cycle) உண்டாகும் ஆற்றலிழப்பு $= 600 \times 0.01 = 6$ ஜூல்

எனவே தேக்க விளைவினால் உண்டாகும் திறனிழப்பு (power loss)

$= 6$ ஜூல் $\times 50$ ஹெர்ட்ஸ்

$= 300$ வாட்டு

3. 440 வோல்ட்டு, 50 ஹெர்ட்ஸ் மின்மாற்றியில் மொத்த இரும்புத் திறனிழப்பு 2300 வாட்டு.அதேசமயம் 220 வோல்ட்டு 25 ஹெர்ட்ஸ் என இருக்கும்பொழுது மொத்த இரும்புத் திறனிழப்பு 750 வாட்டு. மொத்தச் சுழிமின்னோட்டத் திறனிழப்பினை இயல்பான மின் அழுத்தத்திலும், அதிர்வெண்ணிலும் கணக்கிடுக.

இரும்பினால் செய்யப்பட்ட உள்ளகத்தில் தேக்கவிளைவு ஆற்றலிழப்பும், சுழி மின்னோட்ட ஆற்றலிழப்பும் உள்ளன என்பது தெரிந்ததே. இவ்விழப்புகள் தூண்டப்

பட்ட மின்னழுத்தத்தையும், பயன்படுத்தப்படும் அதிர்வெண்ணையும் சார்ந்துள்ளன. குறிப்பாக, தேக்க விளைவு ஆற்றலிழப்பு, அதிர்வெண்ணுக்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது. தூண்டப்பட்ட மின்னழுத்தமும் அதிர்வெண்ணுக்கு நேர்விகிதத்தில் இருப்பதால், தேக்க விளைவு ஆற்றலிழப்புத் தூண்டப்பட்ட மின்னழுத்தத்திற்கு நேர் விகிதத்தில் இருப்பதாக எடுத்துக் கொள்ளலாம். சுழி மின்னோட்ட ஆற்றலிழப்பு அதிர்வெண்ணின் வர்க்கத்திற்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது. அதனால் முறையே W_e, W_h என்பனவற்றைச் சுழி மின்னோட்டத்திறனிழப்பு, தேக்கவிளைவுத் திறனிழப்பு எனக்கொண்டால், $W_e \alpha f^2, W_h \alpha V$ மற்றும் $V \alpha f$.

220 வோல்ட்டு, 25 ஹெர்ட்சு மின்மாற்றியில் ஏற்படும் மொத்த இரும்புத் திறனிழப்பு $= W_e + W_h = 750$ வாட்டு. (1)

440 வோல்ட்டு, 50 ஹெர்ட்சு மின்மாற்றியின் இரும்புத் திறனிழப்பு $= 4W_e + 2W_h = 2300$ வாட்டு. (2)

சமன்பாடு (1) ஐ இரண்டால் பெருக்கி, பின் அதை இரண்டாம் சமன்பாட்டால் கழிக்க, $W_e = 400$ வாட்டு எனக் கிடைக்கும். எனவே $W_h = 350$ வாட்டு. இயல்பான மின்னழுத்தத்தில் (220 வோல்ட்டு, 50 ஹெர்ட்சு), தேக்க விளைவுத் திறனிழப்பு $W_h = 350$ வாட்டு ஆகும். ஆனால் சுழிமின்னோட்டத் திறனிழப்பு $4W_e$ ஆகும். இயல்பான மின் அழுத்தத்திலும் அதிர்வெண்ணிலும் (220 வோல்ட்டு, 50 ஹெர்ட்ஸ்) சுழி மின்னோட்டத்திறனிழப்பு 1600 வாட்டு ஆகும்.

4. போரின் ஹைடிரஜன் அணு மாதிரியில், ஓர் எலெக்ட்ரான் அணுக்கருவைச் சுற்றி 5.1×10^{-11} மீ ஆரமுடைய வட்டப்பாதையில் ஒரு செகண்டிற்கு 6.8×10^{15} சுற்றுகள் வீதம் சுற்றி வருகிறது எனில், அதன் நடுவில் ஏற்படும் காந்தத்தூண்டல் மற்றும் காந்த இருமுனைவு திருப்புத்திறன் ஆகியவற்றைக் கணக்கிடுக.

சுற்றுப்பாதையில் எலெக்ட்ரான் சுற்றுவதால் ஏற்படும் மின்னோட்டம் $= i = \frac{dq}{dt} = e\nu$

$$= 1.6 \times 10^{-19} \times 6.8 \times 10^{15}$$

$$= 1.1 \times 10^{-3} \text{ ஆம்பியர்.}$$

காந்தத்தூண்டல் $`B' = \frac{\mu_o i}{2R} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 1.1 \times 10^{-3}}{2 \times 5.1 \times 10^{-11}} = 13.55$ டெஸ்லா

காந்தத்திருப்புத்திறன் $= iA = 1.1 \times 10^{-3} \times \pi(5.1 \times 10^{-11})^2$

$$= 9 \times 10^{-24} \text{ ஆம்பியர்-மீ}^2$$

5. ஒரு காந்தப் பொருளில், காந்தப்புலவலிமை 10^6 ஆம்பியர்/மீ. காந்த ஏற்புத்திறன் 0.5×10^{-5} எனில் அதன் காந்தமாக்குச் செறிவையும், காந்தத்தூண்டலையும் கணக்கிடுக.

$$\chi = \frac{I}{H}$$

$$\therefore\ I = \chi H = 0.5 \times 10^{-5} \times 10^{6} = 5 \text{ ஆம்பியர்/மீ}$$

$$B = \mu_o(I + H) = 4\pi \times 10^{-7}\,(5 + 10^{6})$$

$$= 1.257 \text{ டெஸ்லா}.$$

சுருக்கம்

(1) எதிர்க் காந்தப்பொருள்கள் காந்த விசைக்கோடுகளை எதிர்க்கின்றன. ஆனால், பாராக்காந்தப் பொருள்கள் அவற்றைக் கவர்கின்றன. இரும்பியல் காந்தப்பொருள்கள் காந்த விசைக்கோடுகளை மிக்க ஈர்ப்புடன் தம்மகத்தே கவர்கின்றன.

(2) ஓர் அணுவில் நிலையான காந்தத் திருப்புத்திறன் பல வழிகளின்மூலம் ஏற்படுகிறது. அதில் முக்கியமானது இரட்டையாகா எலெக்ட்ரான்களின் தற்சுழற்சியின் மூலம் வருவது ஆகும்

(3) பக்கத்து அணுக்களில் உள்ள இரட்டையாகா எலெக்ட்ரான்களோடு சேர்ந்து சுழற்சி இடைவினைகள் நடைபெற்று, மேலும், அவை நல்ல இணைப்பெறுமையில் இருப்பதால் இரும்பியல் காந்தப் பொருள்களில் மிகுதியான காந்தத் திருப்புத்திறன்கள் கிடைக்கின்றன. இரும்பு, நிக்கல், கோபால்ட் போன்றவை இரும்பியல் காந்தப் பொருள்களாகும்.

(4) அல்லிரும்பியல் காந்தப்பொருளில் பக்கத்து அணுக்களின் காந்தத் திருப்புத்திறன்கள் எதிரிணையாயிருப்பதால் அதன் மொத்தக் காந்தத் திருப்புத்திறன் சுழியாகும். ஆனால் ஃபெரிகாந்தப்பொருள்களில் பக்கத்து அணுக்களின் காந்தத் திருப்புத்திறன்கள் எதிரிணையாக இருந்தாலும் வெவ்வேறு மதிப்புடையதாய் இருப்பதால் அவற்றில் மொத்தக் காந்தத் திருப்புத்திறன் சுழியாய் இராது.

(5) இரும்பியல் பொருளின் காந்தப்பெருங்கூறுகள் ஒவ்வொன்றும் முழுமையாய்க் காந்தத்தன்மை பெற்றிடினும், அவை வெவ்வேறு திசைகளில் நிலைக்கொண்டுள்ளன. அதனால், இரும்பியல்பொருள் காந்தமாயிருக்க வெளிக்காந்தப்புலம் தேவையாகிறது. அந்த வெளிக்காந்தப்புலத்தில் அனைத்துப் பெருங்கூறுகளும் காந்தப்புலத்தின் திசையில் முகப்புநிலை கொள்கின்றன

(6) தேக்கக் கண்ணியைப் பெருங்கூறு சுவர்களின் இடப்பெயர்ச்சி மூலமும், பெருங்கூறு சுழற்சி மூலமும் விளக்கலாம்.

(7) மென்காந்தப்பொருள்களில் குறைவான தேக்கவிளைவு ஆற்றலிழப்பும், சுழிமின்னோட்ட ஆற்றலிழப்பும் உள்ளன. மின்எதிர்ப்புத்திறனைக் கூட்டுவதன்மூலம் சுழிமின்னோட்ட ஆற்றலிழப்பினைக் குறைக்கலாம். இப்பொருள்களில் அணிக்கோவை குறைபாடுகள் ஏதும் இல்லாததால் பெருங்கூறு சுவர்கள் எளிதாய் இடப்பெயர்ச்சி செய்யமுடியும்.

(8) கடின காந்தப்பொருளில் காந்தமாக்கும் புலத்தை நீக்கிவிட்டாலும் மிகுதியான காந்தமாக்கச் செறிவைத் தன்னுள் வைத்துக்கொள்ளும். இதில் பெருங்கூறுச்சுவர்கள் எளிதாய் இடப்பெயர்ச்சி செய்யமுடியாது. மேலும், தேக்கக் கண்ணியின் பரப்பு அதிகமாயிருக்கும்.

(9) ஃபெரைட்டுகளில் சீரான ஸ்பைனெல், தலைகீழ் ஸ்பைனெல் போன்ற இருவித இயலமைப்புகள் உள்ளன. அவைகளில் காணப்படும் பரிமாற்றுவிசைகள் அல்லிரும்பியல் வகையைச் சேர்ந்தவை. அவைகளில் உயர் அதிர்வெண்களில் மின் எதிர்ப்புத்திறன் மிகுதியாயிருப்பதால் குறைவான சுழிமின்னோட்டத் திறனிழப்பும் காந்த நீக்கு விசை குறைவாய் இருப்பதால் குறைவான தேக்க விளைவுத்திறனிழப்பும் உள்ளன. எனவே அவை உயர்அதிர்வெண்களில் பயன்படுத்தப்படுகின்றன.

வினாக்கள்

1. ஒருசிறிய பாராக்காந்தப்பொருளான Fe_2, O_3 துண்டில் உள்ள காந்தப் புலச் செறிவு 10^6 ஆம்பியர்/மீ. அறைவெப்பநிலையில் அதன் காந்த உட்புகுதிறன் 1.4×10^{-3}. அதன் காந்தத் தூண்டல், காந்தச் செறிவு ஆகியவற்றைக் கணக்கிடுக. திரவ நைட்டிரஜன் வெப்பநிலையில் அதன் காந்தச்செறிவு எவ்வளவு இருக்கும்?

   (காந்தத்தூண்டல் $= 1.257$ வெபர்/மீ^{2}, காந்தச்செறிவு $= 1400$ ஆம்பியர்/மீ. திரவ நைட்ரஜன் வெப்பநிலையில் காந்தச் செறிவு $= 5000$ ஆம்பியர்/மீ)

2. மேக்னடைட்டின் தெவிட்டு காந்தச் செறிவைக் கணக்கிடுக. மேக்னடைட்டில் கனசதுர அலகு செல்லில் அணிகோவை மாறிலி 8.37 ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகள். அதன் அலகு செல்லில் 16 மூன்று இணைதிறன் கொண்ட இரும்பு அயனிகளும் 8 இருஇணைதிறன் கொண்ட இரும்பு அயனிகளும் உள. (510000 ஆம்பியர்/மீ).

3. ஓர் இயல்பான காந்தத் தூண்டல் உள்ள மின்மாற்றியின் உள்ளகத்தின் மொத்த இரும்புத்திறனிழப்பு முறையே 25 ஹெர்ட்ஸ், 50 ஹெர்ட்ஸ்களில் 250 வாட்டு, 800 வாட்டு ஆகும். 50 ஹெர்ட்ஸில் அதனுடைய (i) தேக்கவிளைவுத் திறனிழப்பினையும், (ii) சுழிமின்னோட்டத் திறனிழப்பினையும் கணக்கிடுக. ((i) 200 வாட்டு, (ii) 600 வாட்டு).

4. எதிர், பாரா, இரும்பியல், ஃபெரி காந்தப் பொருள்களுக்கு இடையே உள்ள வேறுபாடுகளைக் கூறுக. அவற்றின் குணங்களையும், முக்கியப்பயன்களையும் உதாரணங்களோடு எழுதுக.

5. பாராக்காந்தப் பொருள், இரும்பியல் காந்தப் பொருள் என்றால் என்ன? உதாரணங்கள் தருக. இலாஞ்சுவின் பாராக் காந்தக் கொள்கையை விளக்கி ஒரு வாயுவின் பாராக்காந்த ஏற்புத்திறனுக்கான கோவையைத் தருவி. இக்கொள்கையில் உள்ள குறைபாடுகளைக் கூறுக.
6. இரும்பியல் காந்தம் பற்றி வெயிஸின் கொள்கை என்ன? அதன் தோல்வியைப் பற்றிக் குறிப்பிடுக. ஹைஸன்பர்க்கின் இரும்பியல் காந்தக் கொள்கையைப் பற்றிச் சிறுகுறிப்பு வரைக.
7. பெருங்கூறு வளர்ச்சியில் ஈடுபட்டுள்ள பல்வேறு ஆற்றல்களைக் கூறி விளக்குக. பெருங்கூறு கொள்கையின் மூலம் எங்ஙனம் தேக்கக் கண்ணியை விளக்குவாய்?
8. கடின, மென் காந்தப் பொருள்கள் என்றால் என்ன? அவற்றின் குணங்களையும், பயன்களையும் விரிவாய்க் கூறுக.
9. ஃபெரைட்டுகளின் இயலமைப்புப்பற்றி விவரி. ஃபெரைட்டுகளில் காணப்படும் பரிமாற்று விசைகள் பற்றிக் குறிப்பு வரைக.
10. சிறு குறிப்பு வரைக:
    (அ) அல்லிரும்பியல் காந்தம் (ஆ) காந்தப் பரிமாண மாற்றம்
    (இ) இரும்பியல் கனசதுரம் (ஈ) மீள் செயல், மீளாச் செயல் பெறுங்கூறுகள்.
    (உ) பார்க்கூசன் விளைவு

மேற்கோள் நூற்பட்டியல்:

1. 'Magnetic Properties of Solids' – Crangle, Arnold, London, 1977.
2. 'An Introduction to Magnetic Materials' – B.D. Cullity, Addison – Wesley Publishing Company, Phillippines, 1972.
3. 'Material Science' – G.B.S. Narang, Kanna Publishers, Delhi, 1985.
4. 'An Introduction to Solid State Physics and its applications' – R.J. Elliott and A.F. Gibson, The Macmillan Press Ltd, London, 1976.

8. மீக்கடத்திகள்

8.1 அறிமுகம்

மிகக் குளிர்ச்சியான சில பொருள்கள் மின்னோட்டத்தை மின்தடை இழப்பு ஏதும் இல்லாமல் தம்முள் கடத்துகின்றன. இதனையே மீக்கடத்துகை அல்லது அதி மின்கடத்தல் (superconductivity) என்பர். மீக்கடத்துகை உடைய பொருள்களை மீக்கடத்திகள் (superconductors) என்பர். இதுவரை கடத்திகள், குறைகடத்திகள், மின்கடத்தாப் பொருள்கள் பற்றிக்கண்டோம். மேலும், கடத்தியில் வெப்பநிலையைக் குறைத்துக்கொண்டே போனால் அதன் மின்கடத்துந்திறனும் கூடிக்கொண்டே போகும் என்பதனையும் அறிந்தோம். ஆனால் அக்கடத்தியின் வெப்பநிலை சுழிகெல்வின் வெப்பநிலையை நெருங்கும்போது அதன் மின்தடை மதிப்பு ஏறத்தாழச் சுழியாய் மாறி, அதன் மின்கடத்துந்திறன் வரையிலி (infinity)யாகி விடுகிறது. இந்த உண்மை உலோகக் கடத்திகளுக்கு மட்டுமல்லாது சில குறைகடத்திகள், சேர்மங்கள், பல கலப்பு உலோகங்கள் ஆகியவற்றிற்கும் பொருந்தும். இந்த விந்தைமிகு நிகழ்ச்சியை முதலில் கண்டறிந்தவர், டச்சுத்தேசத்து இயற்பியல் வல்லுநரான காமர்லிங் ஒன்ஸ் (Kammarling Onnes) ஆவார். 1911 ஆம் ஆண்டு அவர் சுழிகெல்வின் வெப்பநிலையை அடையும் பரிசோதனையில் ஈடுபட்டிருக்கும்போது பாதரசத்தின் வெப்பநிலை 4.2 கெல்வினை அடைந்தவுடன் அதன் மின்தடை திடீரென்று குறைந்து சுழிநிலையை அடைதலைக் கண்டார். அவர் கண்டுபிடிப்பின் மூலமாய் இன்று பொறியியற்றுறையிலும், அறிவியற்றுறையிலும் பல நன்மைகள் கிடைத்துள்ளன. மேலும், பல பயன்கள் கிடைக்கவும் வழிசெய்யப்படும்.

உலகின் பல பகுதிகளிலும் மீக்கடத்துகையை உயர்வெப்பநிலையில் பெற ஆய்வுகள் மேற்கொள்ளப்பட்டுள்ளன. இவ்வத்தியாயத்தில் மீக்கடத்துகைநிலை பற்றிய கருத்தியலும், மீக்கடத்திகளின் பொதுவான இயற்பியற் பண்புகளும், மேலும் குறைவெப்ப மீக்கடத்திகள் மற்றும் உயர்வெப்ப மீக்கடத்திகளும் விவரிக்கப்பட்டுள்ளன.

8.2 பெயர்வு வெப்பநிலை

மீக்கடத்துகை நிகழ்ச்சியில் மின்தடை திடீரென்று குறைந்து சுழியாகிறது. அதனால் இம்மாற்றம் மிகக் குறுகிய வெப்பநிலை நெடுக்கத்தில் (temperature range) நிகழ்கிறது எனக் கொள்ளலாம். அதனால் ஒருமாறுநிலை வெப்பநிலையை நாம் வரையறுக்க முடியும். ஒருபொருளின் மின்தடை எந்தவொரு வெப்பநிலையில் சுழியாகத் தாழ்ந்து, அதற்குத் தாழ்ந்த வெப்பநிலைகளில் சுழியாகவே நிலை பெறுகின்றதோ அந்த வெப்பநிலை '**மாறுநிலை வெப்பநிலை** (critical temperature)' அல்லது '**பெயர்வு வெப்பநிலை** (transition temperature)' எனப்படும். பின்வரும் அட்டவணை 8.1 பலபொருள்களுக்கு உரிய பெயர்வு வெப்பநிலையின் மதிப்பினைத் தருகிறது. குறிப்பாக தனிமநிலையிலுள்ள உலோகங்களுக்கும், சில சேர்மகுறைகடத்திகளுக்கும் கொடுக்கப்பட்டுள்ளன.

அட்டவணை 8.1

மீக்கடத்திகளும், அவற்றின் பெயர்வு வெப்பநிலைகளும்

பொருள்		பெயர்வு வெப்பநிலை (கெல்வினில்)
(அ) தனிமங்கள் (elements) :		
ஹாப்பினியம்	(Hf)	0.35
துத்தநாகம்	(Zn)	0.79
அலுமினியம்	(Al)	1.14
வெள்ளீயம்	(Sn)	3.69
பாதரசம்	(Hg)	4.12
காரீயம்	(Pb)	7.26
நியோபியம்	(Nb)	9.22
(ஆ) சேர்மங்கள், உலோகக் கலவைகள் (alloys) :		
நியோபியம் நைட்ரைடு (NbN)		14.70
நியோபியம்-அலுமினியம் (Nb_3 Al)		18.00
நியோபியம்-வெள்ளீயம் (Nb_3 Sn)		18.10
நியோபியம்-ஜெர்மேனியம் (Nb_3 Ge)		22.65
(இ) குறைகடத்திகள் (semiconductors) :		
ஜெர்மேனியம் டெலுரைடு (GeTe)		0.30
நியோபியம் ஆக்ஸைடு (NbO)		1.25

அட்டவணை 8.1 மூலம் தனிமங்களுக்குப் பெருமபெயர்வு வெப்பநிலை ஏறத்தாழ 10 கெல்வினும், உலோகக் கலவைகளுக்கு பெருமபெயர்வு வெப்பநிலை 23 கெல்வினும் உள்ளது என்பது தெரியவரும். குறிப்பாக A15 என்ற சிக்கலான படிக இயலமைப்பினை உடைய நியோபியத்தின் சேர்மங்களான Nb_3 Ge மற்றும் Nb_3 Sn ஆகியவை உயர்ந்த பெயர்வு வெப்பநிலை கொண்டிருப்பதால் அவை பொறியியற்றுறையில் மிக முக்கியத்துவம் வாய்ந்ததாய் உள்ளன. தற்போது லாந்தனம்- ஸ்ட்ரான்சியம்-நியோபியம்-ஆக்ஸிஜன் அமைப்பில் பெயர்வு வெப்பநிலை 255 கெல்வினுக்கு அருகில் உள்ளதெனக் கண்டுபிடிக்கப்பட்டுள்ளது

8.3 பெயர்வு வெப்பநிலையில் பொருளில் ஏற்படும் இயற்பியல் மாற்றங்கள்

(அ) மின்தடை சுழியாகிறது.

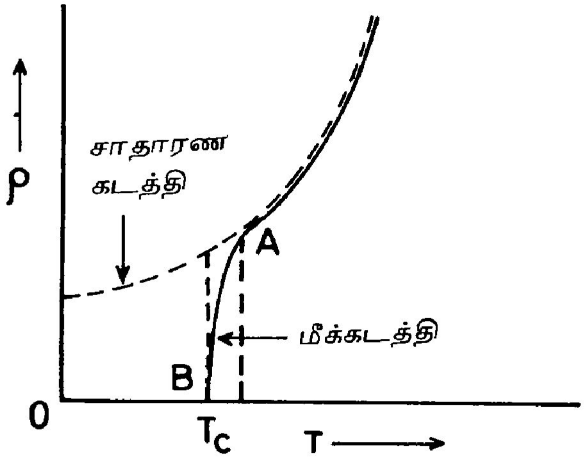
(ஆ) மீக்கடத்தியை ஒரு சீரான காந்தப் புலத்தில் கிடத்தும் போது காந்தப்பாயம் (flux) பொருளிலிருந்து நீக்கப்படுகிறது. அதனால் மீக்கடத்திகள் நல்ல எதிர்க் காந்தப் பொருள்களாக விளங்குகின்றன.

(இ) தன் வெப்ப ஏற்புத் திறனின் (specific heat) மதிப்பில் தொடர்ச்சியிலா மாற்றம் நிகழ்கிறது.

(ஈ) வெப்பங்கடத்துந்திறனில், மின் கடத்துந்திறனின் மதிப்பு வரையிலியாய் மாறுவதுபோல் இல்லாமல் சிறிது மாற்றமே நிகழ்கிறது

(உ) பொருளின் கன அளவில் சிறிது மாற்றம் ஏற்படுகிறது.

8.4 மீக்கடத்திகளில் பெயர்வு பகுதியின் அகலம்



படம் 8.1 மிகக் குறைந்த வெப்பநிலைகளில் மின் எதிர்ப்புத் திறனுக்கும் வெப்பநிலைக்கும் உள்ள தொடர்பு.

படம் 8.1 இல் காட்டியபடி மீக்கடத்திகளில் பெயர்வு பகுதியின் அகலம் AB, குறிப்பிடும்படியுள்ள அளவைப் பெற்றுள்ளது. அது மீக்கடத்தியிலுள்ள வேற்றுப்பொருள்களையும், உள் தகைவுகளையும் (internal stresses) சார்ந்துள்ளது. வேதியியல் முறைப்படி சுத்தமானதும், அணிக்கோவையில் குறைபாடுகள் ஏதும் இல்லாததுமான ஒருபடிகத்தில் பெயர்வு பகுதியின் அகலம் AB மிகக்குறுகியதாயிருக்கும். அஃதாவது, ஏறத்தாழ 'A' யும் 'B'யும் வெப்பநிலை அச்சுக்குச் செங்குத்தான ஒரே கோட்டில் அமைந்துவிடும். பெயர்வு பகுதியின் அகலத்தால் மீக்கடத்துகை துல்லியமாக ஒருமாறுநிலை வெப்பநிலையில் ஏற்படாமல் அதற்குச் சற்று முன்பே தோன்றிவிடுகிறது. இதனாலேயே

விஞ்ஞானிகள் முழுமையான மீக்கடத்துகை தோன்றும் வெப்பநிலையை மாறுநிலை வெப்பநிலையாகக் கொள்வர். மேலே காட்டியுள்ள படத்தில் சாதாரண உலோகம், மீக்கடத்தி ஆகியவற்றில் வெப்பநிலை மாறும்போது அவைகளின் மின்எதிர்ப்புத்திறன்கள் எவ்வாறு மாறுகின்றன என்பது காட்டப்பட்டுள்ளது. மீக்கடத்தியில் பெயர்வு வெப்பநிலை வந்தவுடன் திடீரென்று மின்எதிர்ப்புத்திறன் சுழியாகிவிடுகிறது. ஆனால், சாதாரண உலோகத்தில்மின்எதிர்ப்புத்திறன்ஏறத்தாழஒருமாறிலியாயுள்ளது.சாதாரணஉலோகத்தின் அந்த மாறா மின் எதிர்ப்புத் திறன் வெப்பநிலையைச் சார்ந்திராது. அணிக்கோவைக் குறைபாடுகளால்வருவதொன்றாகும்.

8.5 மீக்கடத்துகை ஏற்படுதலுக்குரிய விளக்கம்

மீக்கடத்துகையைப் பல கோணங்களிலிருந்து விளக்கலாம்.

(1) முதலில் ஓர் எளிய விளக்கத்தைக் காண்போம். மிகத்தாழ்ந்த வெப்பநிலையில் உள்ள ஒருபொருளில் மின்னோட்டம் பாயும்போது அப்பொருளணுக்களினுடைய கருக்களின் அதிர்வுகள் மிக அதிக அள்வில் குறைக்கப்பட்டு, அவற்றைக் கடக்கும் எலெக்ட்ரான் அலைகளுடன் ஒத்தியங்க (synchronise)த் தொடங்குகின்றன. அவ்வாறு நிகழும்போது மின்னோட்டத்திற்குரிய மின் எதிர்ப்பு அல்லது மின்தடை முழுவதும் மறைந்துவிடுகிறது.

(2) **பிசிஎஸ் கொள்கை** (BCS theory) : இருமுறை நோபல் பரிசினை வென்ற ஜான்பார்டின் (John Bardeen), லியான் கூப்பர் (Leon Cooper), ஜான் செரீப்பெர் (John Schrieffer) ஆகியோர் 1957 ஆம் ஆண்டுவாக்கில் மீக்கடத்துகை நிகழ்தற்குரிய விளக்கத்தைக் கவள எந்திரவியல் முறையில் விளக்கினார்கள். அக்கொள்கையின் சுருக்கம் பின்வருமாறு :

ஒருபொருளின் அணிக்கோவை அதிர்வுகளின் மூலம் எதிரெதிர் சுழற்சிகளையுடைய எலெக்ட்ரான்கள் இணைகின்றன. இதனையே **கூப்பர் இரட்டை** (Cooper pair) என்பர். இவ்விரட்டையின் ஓர் எலெக்ட்ரான், அணிக்கோவையோடு இடைவினை புரிந்து அதில் உருக்குலைவு ஏற்படுத்துகிறது. இவ்விதம் ஏற்படுத்தப்பட்டபின், அவ்விரட்டையின் மற்றொரு எலெக்ட்ரானின் ஆற்றலை அணிக்கோவை எடுத்துக்கொள்கிறது. இவ்வாறு மீக்கடத்துகை கூப்பர் இரட்டை அணிக்கோவையினூடே உருவானவுடன் நிகழ்கிறது. மேலும், அணிக்கோவை உருக்குலைவு அல்லது போனான் புலம் வழியாய் எலெக்ட்ரான்- எலெக்ட்ரான் இடைவினை (interaction) நடப்பதனால் இந்த எதிரெதிர் சுழற்சிகளையும் எதிரெதிர் உந்தங்களையும் உடைய எலெக்ட்ரான்கள் இரட்டையாய் உருவெடுக்கின்றன. இதனால் எலெக்ட்ரான் இயக்கம் மிகச்சீரான நிலைக்குமாறி, மின்தடை ஏதுமில்லாமல் மின்னோட்டம் பொருளில் பாய்கிறது.

(3) சமீபத்தில் புதுடெல்லியிலுள்ள தேசிய இயற்பியல் ஆய்வுக்கூடத்திலுள்ள (National Physical Laboratory) விஞ்ஞானிகள் எக்போட் (Ekbote), நர்லிகர் (Narlikar) ஆகியோர் மீக்கடத்திகளின் காந்தப்பண்புகளால் புதிய விளக்கம் ஒன்றனைக்

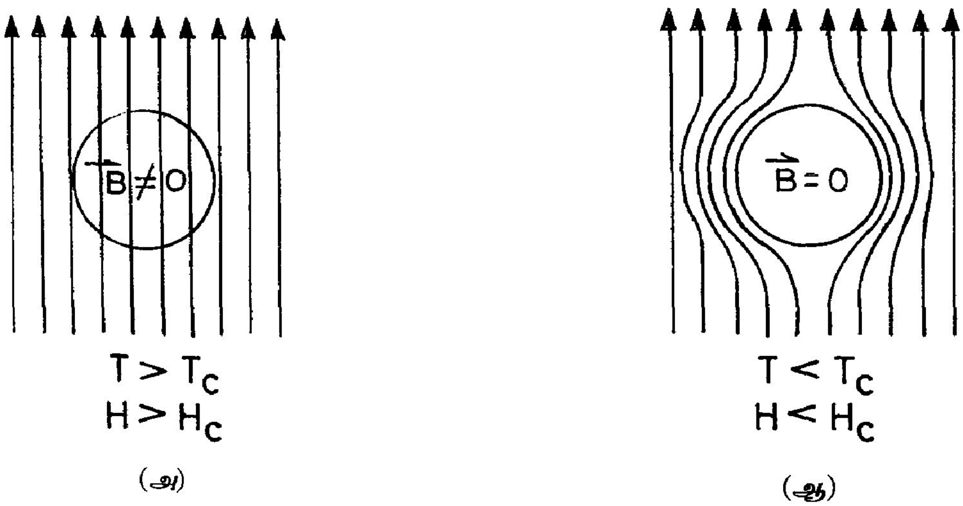
கொடுத்துள்ளனர். அதன்படி மீக்கடத்துகை என்பது கடத்தும் எலெக்ட்ரான்களின் சீரான காந்த அமைப்பாகும். மேலும், ஓர்உலோகம் மீக்கடத்தியாய் மாற வேண்டுமானால் அல்லிரும்பியல் (antiferromagnetic) வகையான எலெக்ட்ரான் இரட்டையும், ஆற்றல் பரிமாற்றமும் நடைபெறவேண்டும். இதனை அவர்கள் தம் பரிசோதனையான கடத்து எலெக்ட்ரானின் சுழற்சி ஒத்திசைவு (Conduction Electron Spin Resonance – CESR) மூலம் விளக்கியுள்ளனர். ஆனால், இதற்கும் பிசிஎஸ் கொள்கைக்கும் சில வேறுபாடுகள் உள்ளன. குறிப்பாய்ப் பிசிஎஸ் கொள்கைப்படி, சிஇஎஸ்ஆர் (CESR) உட்கவரல் மீக்கடத்துகை நிலையில் மறையக்கூடாது. ஆனால், எக்போட், நர்லிகர் தமது பரிசோதனைமூலம் 'Nb_3 Ge' என்னும் உலோகக் கலவைக்கு (அதன் பெயர்வுவெப்பநிலை $T_c = 22.65$ கெல்வின்) 4.2 கெல்வினில் சிஇஎஸ்ஆர் உட்கவரல் மறைந்துவிடுகிறது. இவ்வாறாய் அவர்களுடைய பரிசோதனை முடிவு, பிசிஎஸ் கொள்கைக்குச் சவால் விட்டிருக்கிறது. மேலும், தற்போது கண்டு பிடிக்கப்பட்டுள்ள உயர்வெப்ப மீக்கடத்திகளின் செயல்திறனுக்கு பிசிஎஸ் கொள்கையின் மூலம் சரியான விளக்கம் கொடுக்க முடியவில்லை.

8.6 மீக்கடத்திகளின் சிறப்பியல்புகள்

(அ) மின்தடை :

மீக்கடத்திகள் பெயர்வு வெப்பநிலையை அடைந்தவுடன் அவற்றின் மின்தடை மதிப்புச் சுழியாகிவிடுகிறது. இந்நிலை பெயர்வுவெப்பநிலையைவிடத் தாழ்ந்த வெப்பநிலைகளிலும் நிலைத்திருக்கிறது. இங்ஙனம் மீக்கடத்தியின் மின்தடை மதிப்புச் சுழியாகிவிட்டால் அதனுள் செலுத்தப்படும் மின்னோட்டம் என்றென்றும் அதன் மதிப்புக் குறையாமல் சென்றுகொண்டேயிருக்க வேண்டும். இந்த அடிப்படையில் அமெரிக்க எம்.ஐ.டி. (M.I.T.)யைச் சார்ந்த டாக்டர் காலின்ஸ் (Dr.Collins) ஒருசோதனையை நடத்தினார். அவர் ஒருமீக்கடத்தி வளையத்தில் நிலைபெற்ற ஒருமின்னோட்டத்தை உண்டாக்கிக்காட்டினார். இரண்டரை ஆண்டு காலம் தொடர்ந்து அதிலுள்ள மின்னோட்டத்தை மிகச் சிறந்த கருவிகளால் அளந்த போதிலும், அதிலுள்ள மின்னோட்டம் குறையாமல் இருப்பதை அவர் கண்டார். இங்ஙனம் பல்வேறு சோதனைகளின்மூலம் பின்வரும் முடிவினைக் கூறலாம். மீக்கடத்தி ஒன்று பெயர்வு வெப்பநிலைக்குக் கீழே ஏதேனும் மின்தடையைப் பெற்றிருக்குமானால் அது 'R_s' எனவும், அம் மீக்கடத்தி பெயர்வுவெப்பநிலைக்கு மேற்பட்ட வெப்பநிலைகளில் பெற்றிருக்கும் இயல்பான மின்தடை 'R_n' எனவும் கொண்டால், R_s–ன் மதிப்பு R_n–ல் 10^{-5} மடங்கிற்கும் குறைவாகத்தான் இருக்க முடியும். அதாவது, $R_s/R_n < 10^{-5}$. இதிலிருந்து மீக்கடத்துகை நிலையில் மீக்கடத்தியின் மின்தடை சுழியென்று ஏற்றுக்கொள்வதில் தவறேதுமில்லை எனத் தெரிகிறது.

(ஆ) எதிர்க் காந்தக்குணம் (Diamagnetic property) :



படம் 8.2 (அ) சாதாரண நிலையில் காந்தத்தூண்டல்
(ஆ) மீக்கடத்து நிலையில் காந்தத்தூண்டல்

மீக்கடத்துகை நிலையில் ஒருமீக்கடத்தி, ஒருமுழுமையான எதிர்க்காந்தமாய்ச் (diamagnet) செயல்படும். அஃதாவது, ஒருசீரான காந்தப்புலத்தில் ஒருபொருளை வைத்து, அதன் வெப்பநிலை பெயர்வு வெப்பநிலையைவிடத் தாழ்ந்திருந்து, செலுத்தப்படும் காந்தப் புலச் செறிவும் மாறுநிலைக் காந்தபுலச் செறிவுக்குக் (H_c) குறைந்து இருக்குமானால் பொருளிலுள்ள காந்தப்பாயம் அனைத்தும் வெளியேற்றப்பட்டுப் பொருளினுள் காந்தத் தூண்டல் 'B'யின் மதிப்புச் சுழியாயிருக்கும். இதனையே **மெயிஸ்னர் விளைவு** (Meissner effect) என்பர். இதன்மூலம் ஒருபொருளில் மீக்கடத்துகைநிலை வர இரு முக்கிய நிபந்தனைகள் உள என்பதை அறியலாம். முதலாவதாய்ப் பொருளின் மின் எதிர்ப்புத்திறன் 'ρ' சுழியாயும், இரண்டாவதாய்ப் பொருள் முழுமையான எதிர்க்காந்தத் தன்மையுடையதாயும் இருக்கவேண்டும். இவ்விரண்டு நிபந்தனைகளும் ஒன்றனையொன்று சார்ந்திராத நிபந்தனைகளாகும். இதனைப் பின்வருமாறு விளக்கலாம். பொருளின் காந்தத் தூண்டல்,

$$B = \mu_o (I + H)$$

மீக்கடத்துகைநிலையில், $B = 0 = I + H$

$$\therefore H = -I$$

எனவே காந்த ஏற்புத்திறன், $\chi = -\frac{I}{H}$, எதிர்க்குறியுடையதாய் இருக்கும். இதனைச் சுழி மின் எதிர்ப்புத்திறனால் கொண்டுவர முடியாது. மேலும், பொருளின்கண் உள்ள

மின்னோட்ட அடர்த்தி

$$J = \sigma E$$

(அல்லது) $$\rho J = E$$

இதில் $\rho =$ மின் எதிர்ப்புத்திறன் ; $\sigma = \frac{1}{\rho} =$ பொருளின் மின்கடத்துந்திறன் ; மீக்கடத்துகை நிலையில், $\rho = 0$. எனவே $E = 0$ அல்லது $\nabla \times E = 0$.

மின்காந்தவியலின் அடிப்படையாயுள்ள மாக்ஸ்வெல் (Maxwell) சமன்பாடுகளின்படி,

$$\nabla \times E + \frac{\partial B}{\partial t} = 0$$

$$\nabla \times E = \frac{-\partial B}{\partial t} = 0$$

அஃதாவது, ஓர் உலோகத்தில் பெயர்வின்போதோ, குளிர்ச்சியடையும்போதோ அதனுள் செல்லும் காந்தப்பாயம் மாறாது என்று புலப்படும். அஃதாவது, 'B' ஒரு மாறிலியாகும். ஆனால், மெயிஸ்னர் விளைவின்படி மீக்கடத்துகை நிலையில் பொருளினுள் காந்தப்பாயமே இல்லை என்றும் புலனாகிறது. அதாவது பொருளில், $B = 0$ எனவாகும். அதனால் பொருளில் மீக்கடத்துகைக்குரிய இரு நிபந்தனைகளைப் பின்வருமாறு கூறலாம்.

$E = 0$ (மின்தடை சுழியாவதிலிருந்து)

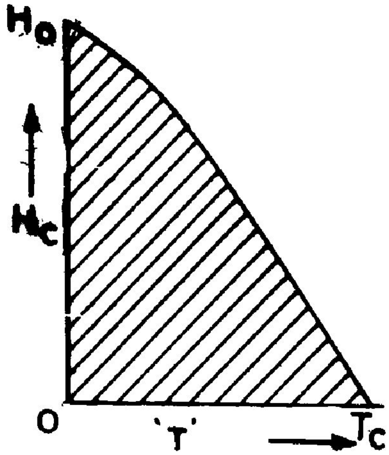
$B = 0$ (மெயிஸ்னர் விளைவிலிருந்து)

(இ) காந்தப் புலத்தினால் ஏற்படும் விளைவு :

பெயர்வு வெப்பநிலைக்குத் (T_c) தாழ்ந்த வெப்பநிலைகளில் பொருளின் மீக்கடத்துகைப் பண்பு அதனுடன் தொடர்புகொண்ட காந்தப் புலத்தையும் சார்ந்திருக்கும். மீக்கடத்தியோடு தொடர்பு கொண்ட காந்தப் புலம் ஒரு குறிப்பிட்ட அளவிற்குமேலே போனால் பொருள் தன் மீக்கடத்துகைப் பண்பினை இழந்துவிடும். இந்த அளவுள்ள காந்தப்புலம் **'மாறுநிலைக் காந்தப்புலம்'** (critical magnetic field (H_c)) எனப்படும். மாறுநிலைக் காந்தப்புலச் செறிவு பொருளின் வெப்பநிலைக்கு ஏற்ப மாறுபடும். சுழி கெல்வின் வெப்பநிலையில் மாறுநிலைக் காந்தப்புலச் செறிவு 'H_o' எனவும், அதன் மதிப்பு 'T' கெல்வின் வெப்பநிலையில் 'H_c' எனவும் கொண்டால்,

$$H_c = H_o\left(1 - \frac{T^2}{T_c^2}\right)$$

இதில் 'T_c' என்பது மாறுநிலை வெப்பநிலை (கெல்வினில்). படம் 8.3இல் வெப்பநிலைக்கேற்ப மாறுநிலைக் காந்தப்புலம் எங்ஙனம் மாறுகிறது என்பது காண்பிக்கப்பட்டுள்ளது.



படம் 8.3 வெப்பநிலைக்கேற்ப மாறுநிலைக் காந்தப்புலம் மாறுதல்

வெப்பநிலை உயர உயர மாறுநிலைக் காந்தப்புலம் மதிப்பும் குறைந்து கொண்டே போகிறது. ஆனால், மாறுநிலை வெப்பநிலையில், $H_c = 0$. எனவே ஒரு குறிப்பிட்ட வெப்பநிலையில் மீக்கடத்துகை நிலையிலுள்ள பொருளில் மீக்கடத்துகை அழிய அந்த வெப்பநிலைக்குரிய மாறுநிலைக் காந்தப்புலத்தைப் பொருளினுள் செலுத்தவேண்டும். அட்டவணை 8.2 இல் சுழி கெல்வின் வெப்பநிலையில் சில மீக்கடத்திகளின் மாறுநிலைக் காந்தப் புலத்தின் மதிப்புகள் கொடுக்கப்பட்டுள்ளன. அனைத்துப் பொருள்களுக்கும் மாறுநிலைக் காந்தப்புல மதிப்பு அதிமாயுள்ளது.

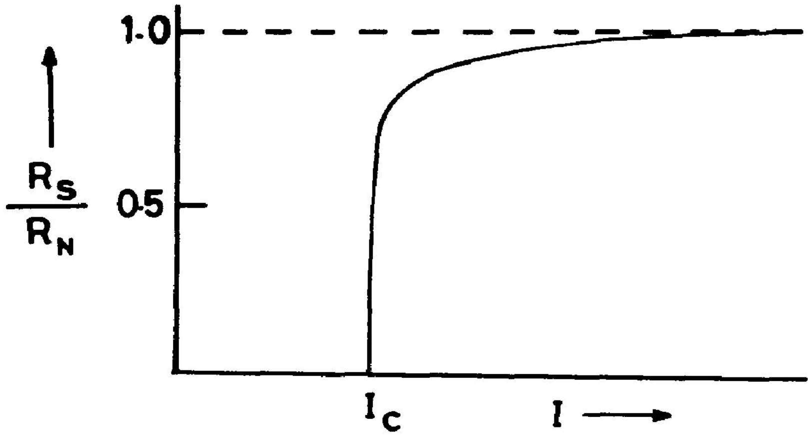
அட்டவணை 8.2

சுழி கெல்வின் வெப்பநிலையில் சில மீக்கடத்திகளின் மாறுநிலைக்காந்தப் புலச் செறிவு (H_o)

பொருள் (தனிமம்)	H_o ஆம்பியர்/மீ $\times 10^3$	பொருள் (சேர்மம்)	H_o ஆம்பியர்/மீ $\times 10^3$
அலுமினியம் (Al)	7.9	பேரியபிஸ்மத் (Ba Bi_3)	59.0
காட்மியம் (Cd)	2.4	கால்சிய சிலிக்கான் ($CaSi_2$)	1.4
பாதரஸம் (Hg)	33.0	நியோபிய வெள்ளீயம் (Nb_3Sn)	18.1
காரீயம் (Pb)	64.0		
வெள்ளீயம் (Sn)	24.5		

(ஈ) அதிக மின்னோட்டத்தினால் ஏற்படும் விளைவு :

மீக்கடத்திகளில் செலுத்தப்படும் வெளிக்காந்தப்புலம் மாறுநிலைக் காந்தப்புலத்திற்கு மேல் சென்றால் அம்மீக்கடத்திகளில் மீக்கடத்துகைப்பண்பு அழிந்துவிடும் என்று பார்த்தோம். அதேபோல் அதிக மின்னோட்டம் அவற்றில் பாயும்போதும் மீக்கடத்துகைப்பண்பு அழிந்துவிடுகிறது. அதனால், மீக்கடத்திகளில் அவற்றின் பண்பை



படம் 8.4 மாறுநிலை மின்னோட்டத்தில் மீக்கடத்தியில் மின்தடை திடீரென்று தோன்றுதல்

அழிக்காமல் அவற்றில் பாயக்கூடிய மின்னோட்டத்திற்கு ஓர் உச்சவரம்பு உண்டு. இதனை நாம் **மாறுநிலை மின்னோட்டம்** (critical current) 'I_c' எனக் கொள்ளலாம். மீக்கடத்தியின் ஊடேசெல்லும் மின்னோட்டம் I ஆனது I_cயை எட்டிய உடனேயே சுழிமின்தடையி லிருந்து திடீரென்று அதன் இயல்பான மின்தடையில் 80 விழுக்காடுகளைப் பெற்றுவிடும் (படம் 8.4). I_c – க்கும் மேலே மின்னோட்டத்தை உயர்த்தினால் மின்தடை உயர்ந்து மீக்கடத்துகைப்பண்பு அழிந்து, அப்பொருள் இயல்பான நிலைக்கு வந்துவிடும். "ஒரு மாறுநிலை மின்னோட்டமும், மாறுநிலைக் காந்தப்புலமும் ஒன்றனுக்கொன்று தொடர்பு கொண்டவையாயிருக்க வேண்டும்" என்று சில்ஸ்பீ (Silsbee) கூறினார். நேர்உருளைக் கம்பியின் (wire) ஆரம் 'r' எனவும், மாறுநிலை மின்னோட்டம் 'I_c' எனவும், மாறுநிலைகாந்தப்புலம் 'H_c' எனவும் கொண்டால், $I_c = 2\pi\, r\, H_c$ எனவாகும்.இது **சில்ஸ்பீ விதி** (Silsbee's rule) எனப்படும். அதனால், மாறுநிலை மின்னோட்டம் ஒரு மீக்கடத்தியில் பாயும்போது மாறுநிலைக்காந்தப்புலம் ஏற்பட, அதன் காரணமாய் மீக்கடத்துகைநிலை அழிய, இயல்புநிலை அப்பொருளுக்குக் கிடைக்கிறது.

(உ) அழுத்தத்தினால் ஏற்படும் விளைவு :

ஒருபொருளை நன்கு அழுத்திக் குளிரப்படுத்துவதன் மூலம் அதன் இயல்பான பெயர்வு வெப்பநிலையின் மதிப்பினை மேலும் உயர்த்தலாம். அதிக அழுத்தங்களில் ஒருபொருளின் பெயர்வு வெப்பநிலை, அதன் மீதுள்ள அழுத்தத்திற்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது. அதிக அழுத்தத்தின்மூலம் பெயர்வு வெப்பநிலையை அறை வெப்பநிலைக்குக் கொண்டுவர ஆய்வுகள் நடைபெற்று வருகின்றன.

(ஊ) ஐசோடோப்புகளினால் ஏற்படும் விளைவு :

"மீக்கடத்திகளின் பெயர்வு வெப்பநிலை ஐசோடோப்பு நிறையைப் பொறுத்து மாறுகிறது' என்பது சோதனையின் மூலம் மாக்ஸ்வெல் என்பவரால் கண்டறியப்பட்டது. குறிப்பாய்ப் பாதரசத்தை எடுத்துக்கொண்டால் அதன் ஐசோடோப்பு நிறை 199.5லிருந்து

203.4 வரை உள்ளது. அதனால், மாறுநிலை வெப்பநிலையின் நெடுக்கம் 4.185 கெல்வினிலிருந்து 4.146 கெல்வின்வரை உள்ளது. இவ்விதமாய்ச் சோதனைகளின் முடிவுகளை ஒரு தொடர்பின் மூலம் எழுதலாம். அஃதாவது, $M^{\alpha} T_c =$ மாறிலி. இதில் α என்பது வேறொரு மாறிலியாகும். இதன் மதிப்புச் சுமார் 0.5 என இருக்கும். அதனால், ஐசோடோப்பு நிறை அதிகரித்தால் அதனுடைய மாறுநிலைவெப்பநிலை மதிப்புக் குறையும். அஃதாவது, மாறுநிலை வெப்பநிலை, ஐசோடோப்பு நிறையின் வர்க்கமூலத்திற்கு எதிர்விகிதத்தில் உள்ளது என அறியலாம்.

8.7 சில பொதுவான கணிப்புகள் (observations)

1) ஒரு மீக்கடத்தியின் பெயர்வு வெப்பநிலையின் மதிப்புத் தனிம அட்டவணையில் அஃது இருக்கும் இடத்தைச் சார்ந்துள்ளது. தனிம அட்டவணையிலுள்ள தொகுதிகளான V, VII ஆகியவற்றிலுள்ள உலோகங்கள் அதிக மதிப்புள்ள பெயர்வு வெப்பநிலையையும், VI, VIII, X தொகுதிகளிலுள்ள உலோகங்கள் குறைவான பெயர்வு வெப்பநிலையையும் கொண்டுள்ளன.

2) பொதுவாக நல்ல மின்கடத்திகள் அதிக மதிப்புள்ள பெயர்வு வெப்பநிலை கொண்ட மீக்கடத்திகளாவதில்லை. உதாரணம் : தாமிரம்.

3) மீக்கடத்தியின் வெப்பங்கடத்தும் திறனின் மதிப்பில் குறிப்பிடும்படியான வீழ்ச்சி உள்ளது. இதிலிருந்து கூப்பர் இரட்டை எலெக்ட்ரான்கள் வெப்பப் பரிமாற்றத்தில் பங்கு எடுக்கவில்லை என்பது தெரிகிறது.

4) மாறுநிலை வெப்பநிலைக்குச் சற்றுக்கீழே மீக்கடத்தியின் தன்வெப்பஏற்புத்திறன் (specific heat) மதிப்புத் தொடர்ச்சியில்லாமல் மிகுகிறது. உதாரணமாய் மாறுநிலை வெப்பநிலைக்குச் சற்றுமேலே வெள்ளீயத்தின் தன்வெப்பஏற்புத்திறன் 0.191 ஜூல்/கிலோகிராம்/கெல்வின் ஆக உள்ளது. ஆனால். மாறுநிலை வெப்பநிலைக்குச் சற்றுகீழே தன்வெப்பஏற்புத்திறன் 0.274 ஜூல்/கிலோகிராம்/கெல்வின் என்று உள்ளது.

5) வெப்பநிலை மாற்றமின்றி ஒருகாந்தப்புலனால் ஒருபொருளின் மீக்கடத்தும் தன்மை அழிக்கப்படும்போது மீக்கடத்தி வெப்பத்தை உட்கிரகிக்கிறது. அதே காந்தப்புலம் சுழியாகும்போது அது பெயர்வின் உள்ளுறை வெப்பத்தை (latent heat of transition) வெளியிட்டு மீக்கடத்துத் தன்மையை அடைகிறது.

6) இரும்பியல் பொருள்களும் (Fe, Co, Ni), அல்லிரும்பியல் பொருள்களும் (CoO, NiO) மீக்கடத்திகளாய் ஆக முடியாது.

7) ஒருபொருளின் மீக்கடத்துகைப் பண்பு அதன் படிக அமைப்பினையும் பொறுத்துள்ளது. நாற்கோணப் படிக (tetragonal crystal) அமைப்பில் கிடைக்கும் சாதாரண வெள்ளை நிற வெள்ளீயம் மீக்கடத்தியாகும். ஆனால், கனசதுரப் படிக வடிவில் உள்ள சாம்பல் நிற வெள்ளீயம் மீக்கடத்தியன்று. அதேபோல் பெரிலியம் மென்படலங்களாய் (thin films)ப் படியும் போது மட்டிலும் மீக்கடத்துகைப்

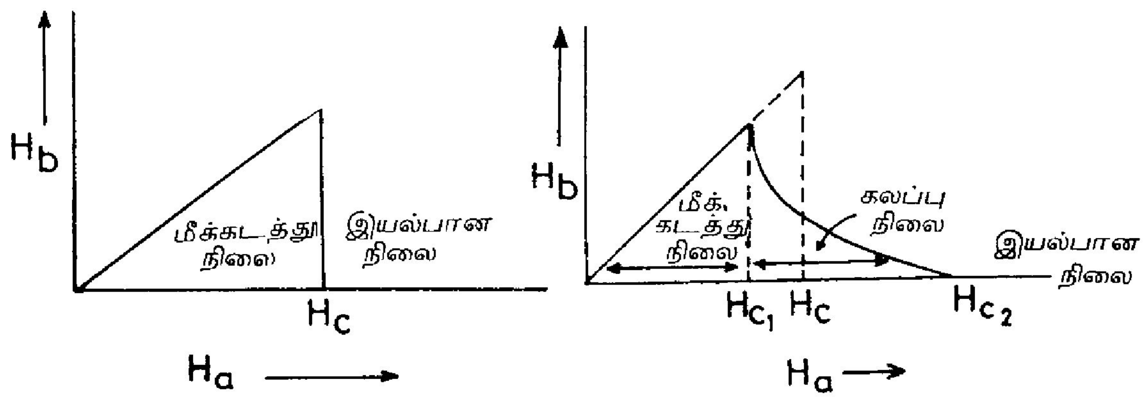
பண்பினைப்பெறும். ஆனால், பிஸ்மத் ஆனது பெருமளவில் பருமனாக எடுத்துக்கொள்ளப்பட்டு அமுக்கப் பெற்றால்தான மீக்கடத்துகைப்பண்பு அதில் ஏற்படும்.

8) பொதுவாக மெயிஸ்னர் விளைவு ஒரு மீக்கடத்தி மென்படலமாய் இருக்கும்போது முழுமையில்லாமலும், பருமனாய் இருக்கும் போது முழுமை நிலையிலும் இருக்கும்.

8.8 மீக்கடத்திகளின் வகைகள்

மீக்கடத்திகளில் இருவகைகள் உள்ளன முதல வகை மீக்கடத்தி முழுமையான மெயிஸ்னர் விளைவு அல்லது முழுமையான எதிர்க்காந்தத் தன்மையைத தன்னகத்தே கொண்டிருக்கும். மேலும், மாறுநிலை காந்தப்புலச் செறிவு H_c –க்கு மேலே இவ்வகை மீக்கடத்தி இயல்பான கடத்தியாயிருக்கும். மாறுநிலைக் காந்தப்புலத்திற்குக் கீழே பொருளினுள் இருக்கும் காந்தப்பாயம் அனைத்தையும் வெளியேற்றி விட்டு முழுமையான எதிர்க்காந்தம்போல் செயல்படும். இவற்றை மென் மீக்கடத்திகள (soft superconductors) என்றும் கூறுவர். இவ்வகை மீக்கடத்திகளுக்கு மாறுநிலைக் காந்தப்புலச்செறிவு 'H_c' எப்பொழுதும் மிகக் குறைவாயிருககும் (படம் 8.5 (அ)).

உதாரணங்கள் : அலுமினியம், துத்தநாகம், உறாலியம் ஆகியவை மீக்கடத்துகை நிலைகளில் இருக்கும்போது.



(அ) மென்மீக்கடத்தி (ஆ) கடின மீக்கடத்தி

படம் 8.5 மென், கடின மீக்கடத்திகளில் வெளிக் காந்தப்புலம் செயல்படும் விதம். படத்தில் H_a என்பது பொருளினுள் செலுத்தப்படும் வெளிக்காந்தப்புலச் செறிவு ; H_b என்பது பொருளினுள் செலுத்தப்படும் வெளிக் காந்தப்புலச் செறிவால் உண்டாகும் தூண்டப்பெற்ற மின்னோட்டங்களால் ஏற்படும் காந்தப்புலச் செறிவு.

இரண்டாம் வகையைச் சார்ந்த கடின மீக்கடத்திகளில் (hard superconductors), H_{c1} என்ற வெளிக்காந்தப்புலத்தின்போது காந்தப்பாயம் மீக்கடத்திக்குள் நுழையத் தொடங்குகிறது. H_{c1}– இன் மதிப்பு மாறுநிலைக் காந்தப்புலம் H_c–யை விடக்

குறைவாயிருக்கும். வெளிக்காந்தப்புலம் H_{c1}–க்கும் H_{c2}–க்கும் இடையில் இருக்கும்போது பொருள் கலப்புநிலையில் இருக்கும். அஃதாவது, முழுமையான மீக்கடத்தியாகச் செயல்படாது. வெளிக்காந்தபுல மதிப்பு H_{c2}க்கும் மேலே செல்லும்போது பொருள் இயல்பான கடத்தியாகி விடுகிறது. (படம் 8.5 (ஆ)).

உதாரணங்கள் : ஜீர்கோனியம், நியோபியம் ஆகியவை மீக்கடத்துகை நிலைகளில் இருக்கும்போது.

கடின மீக்கடத்திகளில் எந்திரப் பதனிடல் (mechanical treatment) மூலம் தூண்டப்பட்ட காந்தத்தேக்கம் (magnetic hysteresis) அதிகமான அளவு ஏற்படுத்தப்படுகிறது. கடின மீக்கடத்திக் கம்பிகளால் உருவாக்கப்பட்ட நீள் உருளை கம்பிச்சுருள் (solenoid) 100 கிலோ காஸிக்கு (kilo gauss) மேற்பட்ட செறிவுடைய காந்தப்புலனை உற்பத்தி செய்ய முடியும். மேலும் அவற்றால் அதிகச் செறிவுடைய காந்தப்புலன்களில் அதிக மின்னோட்ட அடர்த்தியைச் சுமந்து செல்லமுடியும். அதனால், வியாபாரத்துறையில் கடின மீக்கடத்திகள் முக்கியத்துவம் வாய்ந்தவையாய் விளங்குகின்றன.

8.9 பயன்கள்

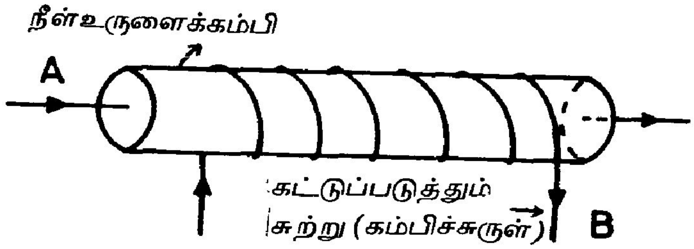
மீக்கடத்தியில் மின்தடை இழப்பு ஏதுமில்லாமல் மின்னோட்டமானது குறையாமல் பாயும் என்பதைக் கண்டோம். பொதுவாக மீக்கடத்துகை ஏற்படுத்த மிகக் குறைந்த வெப்பநிலை தேவைப்படுகிறது. மிகக் குறைந்த வெப்ப நிலையை உண்டாக்க திரவ நிலை ஹீலியம், நைட்ரஜன் பயன்படுகின்றன. மீக்கடத்திகளால் பல பயன்கள் நமக்குக் கிடைக்கின்றன.

1. இது புதிய ஆற்றல் சேமிக்கும் திறனமைப்புகளுக்கு (energy saving power systems) அடிப்படையாயுள்ளது. நடைமுறையில் உள்ள மின்னாக்கிகளோடு (generators) ஒப்பிடும்போது மீக்கடத்தி மின்னாக்கியின் நிறையும், அளவும் மிகக்சிறியனவாயுள்ளன. மேலும், மீக்கடத்தி மின்னாக்கிகள் மிகக்குறைந்த ஆற்றலையே செலவழிப்பதால் நாம் மிகுதியான ஆற்றலைச் சேமிக்க முடியும். அமெரிக்காவில் உள்ள ஜெனரல் எலெக்ட்ரிக் கம்பெனி, எம்.ஐ.டி ஆகியவை இவ்வித மீக்கடத்தி மின்னாக்கிகளைத் தயாரித்துள்ளன. மீக்கடத்திக் கம்பிகளின்மூலம் செய்திகளை அனுப்பும்போது இழப்புகள் ஏதும் ஏற்படுவதில்லை. ஆனால், நடைமுறையில் உள்ள செய்திகள் செலுத்தும் கம்பிகளில் கதிர்வீச்சு முறையில் மிகுதியான ஆற்றல் வீணாகிறது. மீக்கடத்திகளால் உருவான கம்பிகள்மூலம் செய்திகள் அனுப்பும் முறையை விஸ்கான்சின் (Wisconsin) பல்கலைக்கழகமும், வெஸ்டிங்ஹவுஸ் எலெக்ட்ரிக் கம்பெனியும் (Westinghouse Electric Company) தீவிரமாய் ஆராய்ச்சி செய்துவருகின்றன.
2. ஜப்பானில் மீக்கடத்திக் காந்தங்களின் மூலம் இயங்கும் சோதனை இரயிலை அதிக வேகத்தோடும் அதே சமயம் குறைவான செலவோடும் தண்டவாளத்தின்மீது ஓட்டியுள்ளனர். மேலும், மீக்கடத்திக் காந்தங்களின்மூலம் இராக்கெட்டுகளின் துணை இல்லாமல் துணைக்கோள்களை (satellites), அவற்றின் சுற்றுப்பாதைகளில்

தரையிலிருந்து நேராக ஏவ (direct launching) முடியும். மேலும் தாதுப்பொருள்களைப் பிரிக்கும் செயல்திறமிக்க எந்திரங்கள் மீக்கடத்திக் காந்தங்களால் தயாரிக்கப்பட்டுள்ளன. மருத்துவத் துறையில் மூளையில் காணும் குறைபாடுகளைக் காணப் பயன்படும் காந்த ஒத்ததிர்வு பிம்பமாக்கும் கருவியில் (magnetic resonance imaging device) மீக்கடத்திக் காந்தங்களைப் பயன்படுத்தி அதிக மதிப்புடைய காந்தப்புலன்கள் தோற்றுவிக்கப்படுகின்றன. அதிக காந்தப்புலத்தில் மூளையின் பல்வேறு பகுதிகளைத் தெளிவாகத் தெரிந்து கொள்ளலாம்.

3. மீக்கடத்திகளின் மின்தடை சுழியாயிருப்பதனால் மீக்கடத்துகை நிலையில் மீக்கடத்தி வளையத்தினுள் ஒரு மின்னோட்டத்தைத் தொடர்ந்து சுற்றிவரச் செய்யலாம். இந்தப் பண்பின் காரணமாய் அவற்றைக் கணிப்பொறி (computer)யில் நினைவு உறுப்புகளாய் (memory elements)ப் பயன்படுத்தலாம்.

4. ஒரு மீக்கடத்தியின் மீது H_cயைக் காட்டிலும் உயர்ந்த காந்தப்புலத்தைச் செயல் படுத்தினால் அதன் மீக்கடத்தும் பண்பு அழிந்து, அது இயல்பான நிலையை அடையும். இக்குணத்தை வாயில் சுற்றுக்களுக்கு (gating circuits)ப் பயன்படுத்தலாம். இவற்றிற்குக் கிரையோட்ரான்கள் (cryotrons) எனப்பெயரிட்டுள்ளனர் (படம் 8.6). ஒருநீள் உருளை வடிவ மீக்கடத்திக் கம்பி (A)யின்மீது மீக்கடத்தியினால் உருவான கம்பிச்சுருள் (B) சுற்றப்பட்டுள்ளது. உருளைக் கம்பியின் H_c மதிப்பானதுக் கம்பிச் சுருளின் H_c ஐ விட மிக மிகக் குறைவாயிருக்கும்படி மீக்கடத்திப் பொருள்கள்



படம் 8.6 கிரையோட்ரான்.

தேர்ந்தெடுக்கப்பட்டுள்ளன. கம்பிச்சுருள் கட்டுப்படுத்தும் சுற்றாகச் செயல்படுகிறது. அதன் வழியாக ஒரு மின்னோட்டம் பாயும்போது நீள் உருளைக் கம்பியின் அச்சிற்கிணையாக ஒரு காந்தப்புலம் உண்டாகும். இந்நீள் உருளைக் கம்பியின் H_c மதிப்பு மிக மிகக் குறைவானதாய் இருக்குமாறு எடுத்துக் கொள்ளப்படுவதால் கம்பிச்சுருளில் பாயும் சிறு மின்னோட்டத்தால் ஏற்படும் காந்தப்புலம் நீள்உருளைக்கம்பியின் மீக்கடத்துகையை அழித்துவிடும். அதனால், இவ்வமைப்பு ஒரு மின்காந்த இணைப்பி(relay)யாய்ச் செயல்படுகிறது. இது கணிப்பொறிகளில் இணைப்பு உறுப்பாகவும் (switching element) பயன்படுகிறது. ஒருமிகப் பெரிய கணிப்பொறியை மீக்கடத்துகை தன்மையுள்ள உறுப்புக்களைப் பயன்படுத்தி உருவாக்கும்போது அதன் கனஅளவு மிகக் குறைவாயிருப்பதுடன்,

அது செலவிடும் திறன் 1/2 வாட்டுக்கும் குறைவாயிருக்கும. மீக்கடத்துக் கம்பிச்சுருள்கள் காந்த நீரியங்கு திறன் மாற்றத்தில் (magneto hydro dynamic power conversion) மிகவும் பயன்படுகின்றன. மேலும், பருப்பொருளின் (matter) இயலமைப்புப்பற்றி நன்கு தெரியவும், மூளை அலைகளின் செயல்திறனைக் கண்டுபிடிக்கவும் மீக்கடத்துகை பயன்படுகிறது.

8.10 உயர்வெப்ப மீக்கடத்திகள் (high temperature superconductors)

1986 ஆம் ஆண்டுக்கு முன்னால், A- 15 கட்டமைப்பு உள்ள பேரியம் - காரீயம் -பிஸ்மத் ஆக்ஸைடுகள் (Barium-Lead-Bismuth oxides), சோடியம் - டங்க்ஸ்டன் - வெள்ளீயம்-தாமிர உலோகக்கலவைகள் (Sodium-Tungsten-Tin-Copper alloys) போன்ற சில இடைநிலை உலோகச் சேர்மப் பொருள்களுக்கு மட்டும் பெரும பெயர்வு வெப்பநிலை (25 கெல்வின்) இருப்பதாய்க் கருதப்பட்டது. 1986ல் பெல் ஆய்வுக் கூடத்தில் ஆக்ஸிஜன் சூழ்நிலையில் வளர்க்கப்பட்ட இலாந்தன-ஸ்ட்ரான்சிய-தாமிரப் படிகத்தில் பெயர்வு வெப்பநிலை 37 கெல்வினில் இருந்தது. இதனைப் பின்பற்றிச் சீன விஞ்ஞானிகள் 77 கெல்வின் பெயர்வு வெப்பநிலை கொண்ட இலாந்தனம்—ஸ்ட்ரான்சியம்-தாமிரம் ஆக்ஸிஜன் கொண்ட படிகத்தை உற்பத்தி செய்தனர். அமெரிக்காவில் உள்ள ஹௌஸ்டன் பல்கலைக்கழகத்தில் (University of Houston) பேரறிஞர் சூ, தம் குழுவினரின் உதவியோடு 90 கெல்வின் பெயர்வு வெப்பநிலை கொண்ட இட்டிரியம்-பேரியம்-தாமிரஆக்ஸைடு சேர்ம மீக்கடத்தியை (compound superconductor)க் கண்டுபிடித்தார். இது படிப்படியாய் முன்னேறிப் பெயர்வு வெப்பநிலை 165 கெல்வின் வரை சென்றது. பிசிஎஸ் கொள்கையில் கூப்பர் இரட்டையே (cooper pair) மீக்கடத்துகைக்கு முக்கியக் காரணமெனவும், அது மிகக்குறைந்த வெப்பநிலைகளில் மட்டும் ஏற்படும் எனவும் கண்டோம். அதனால், 165 கெல்வின் வெப்பநிலையில் கூப்பர் இரட்டை உருவாக முடியாது. அதனால் பிசிஎஸ் கொள்கையால் அதிகப் பெயர்வு வெப்பநிலை கொண்ட மீக்கடத்திகள் பற்றி விளக்க முடியாது. தற்போது உயர் வெப்ப மீக்கடத்திகள் நடக்கும் மீக்கடத்துகை நிகழ்ச்சியை விளக்க பி.டபிள்யு.ஆன்டர்சன், ஒத்ததிர்வு சக பிணைப்பு நிலைக் கொள்கை (Resonance Valence Bond State Theory) என்றதொரு கொள்கையை வெளியிட்டுள்ளார். இக்கொள்கையைப் பலர் சிறந்த கொள்கையெனக் கூறியுள்ளனர். "ஹைடிரஜன் மூலக்கூறு, எலெக்ட்ரான் இரட்டையால் உருவாதல் போல, மீக்கடத்தியில் எலெக்ட்ரான் இரட்டையோ அல்லது துளை இரட்டையோ உருவாகி சகபிணைப்பின் வழியாய் மீக்கடத்துகை வருகிறது" எனத் தன் கொள்கையில் ஆன்டர்சன் தெரிவித்துள்ளார். இதன்படி எலெக்ட்ரான் இரட்டைமூலம் மீக்கடத்துகை பெறும் மீக்கடத்திகள் '*N*'–வகை மீக்கடத்திகள் ஆகும். இவற்றின் பெயர்வு வெப்பநிலை 20 கெல்வின் மதிப்பே உள்ளது.

உதாரணம் :

$Ln_{2-x}\, Ce_x\, Cu\, O_{4-y}$ அமைப்பு. இதில் x, y மாறும் தன்மை கொண்ட கணியங்கள் ஆகும். மேலும் $Ln = Pr, Nd$ அல்லது Sm.

துளை இரட்டை மூலம் மீக்கடத்துகை பெறும் மீக்கடத்திகள் P– வகை மீக்கடத்திகள் ஆகும். இவை உயர்பெயர்வு வெப்பநிலைகளைக் கொண்டுள்ளன. எனவே இவை ஆய்வுகளில் முக்கியத்துவம் பெற்றுள்ளன.

உதாரணங்கள் : $Y Ba_2 Cu_3 O_{7-y}$, ($Y - Ba - Cu - O$ அமைப்பு),
$Bi_2 (CaSr)_3 Cu_2 O_y$ ($Bi - Ca - Sr - Cu - O$ அமைப்பு),
மற்றும் $La_{2-x} Sr_x Cu O_4$ ($La - Sr - Cu - O$ அமைப்பு).

இவற்றில் உள்ள x-ன் மதிப்பு 0.2 க்கும் குறைவானது; y-ன் மதிப்பு அமைப்பின் நிலைத்தன்மையை (stability)ப் பொறுத்துள்ளது. $La - Sr - Cu - O$, $Y - Ba - Cu - O$ ஆகிய அமைப்புகளுக்கு 80-100 கெல்வின் மதிப்புடைய பெயர்வு வெப்பநிலை உள்ளது. எ.எர்பில் (A.Erbil) என்பவர் $Y - Ba - Cu - O$ அமைப்பில் 550 கெல்வின் வெப்பநிலையில் கூட மீக்கடத்துகை இருக்கிறது என வெளியிட்டு உள்ளார். எனினும் இக்கண்டுபிடிப்பை உலகத்து விஞ்ஞானிகள் இன்னும் உறுதிப்படுத்தவில்லை. $La - Sr - Nb - O$ அமைப்பில் 255 கெல்வினில் கூட மீக்கடத்துகை உள்ளது என கண்டுபிடிக்கப்பட்டுள்ளது. இக்கண்டு பிடிப்பின்மூலம் தாமிரமில்லா $La - Sr - Nb - O$, $Y - Sr - Nb - O$ ஆகிய அமைப்புகளில், அறைவெப்பநிலையில் மீக்கடத்துகை பெற முடியும் என விஞ்ஞானிகள் நம்புகின்றனர். உயர்வெப்ப மீக்கடத்திகள் பீங்கான் தூளை (ceramic powder) அதிர்ச்சி அலை அமுக்கத்தின் (shock wave compression) மூலமாக திண்மமாக்கி உருவாக்கப்படுகின்றன.

மாதிரிக் கணக்கு :

4 கெல்வினில் காரீயத்தின் (lead) மாறுநிலைக் காந்தப் புலச்செறிவின் மதிப்பு 48,000 ஆம்பியர் – சுற்று/மீட்டர். இதனைப் பயன்படுத்தி 4 கெல்வினில் உள்ளதும். 10^{-3} மீட்டர் விட்டமும் உடைய ஒரு காரீயக் கம்பியிலுள்ள மீக்கடத்துகைத் திறனை அழிக்கத் தேவையான மின்னோட்டத்தைக் கணக்கிடுக.

$$I_c = 2\pi r H_c = 2\pi \times 10^{-3} \times 48000/2 = 151 \text{ ஆம்பியர்}.$$

சுருக்கம்

1. மீக்கடத்திகள் சுழி மின்தடை உள்ள பொருள்கள் ஆகும். மீக்கடத்துகை மிகக் குறைந்த வெப்பநிலைகளில் (< 20 கெல்வின்) ஏற்படுகிறது.
2. பிசிஎஸ் கொள்கைப்படி எதிரெதிர் சுழற்சிகளையும் எதிரெதிர் உந்தங்களையும் உடைய எலெக்ட்ரான் இரட்டை, போனான் புலம் மூலமாய் எலெக்ட்ரான் – எலெக்ட்ரான் இடைவினையால் உருவாகிறது. இவ்விரட்டைகள் உருவானவுடன் எலெக்ட்ரான் இயக்கம் சீராகி மீக்கடத்துகை ஏற்படுகிறது.
3. நியோபிய சேர்மப் பொருள்களுக்குத்தான் அதிக மதிப்புள்ள பெயர்வு வெப்பநிலைகள் உள்ளன. உதாரணமாக $Nb_3 Ge$ என்ற உலோகக் கலவைக்குப் பெயர்வு வெப்பநிலை $T_c = 22.65$ கெல்வின் ஆகும்.

4. மெயிஸ்னர் விளைவின்படி ஒருமீக்கடத்தி மீக்கடத்துநிலையில் முழுமையான ஒரு எதிர்க்காந்தமாய்ச் செயல்படும். அஃதாவது, மீக்கடத்தியில் காந்தத் தூண்டல் 'B' $= 0$.
5. ஒருமீக்கடத்தியில் உள்ள மீக்கடத்துகைப் பண்பினை மாறுநிலைக் காந்தப்புலம் செலுத்தி அழிக்க முடியும்.
6. மென், கடின மீக்கடத்திகள் உள்ளன. மென் மீக்கடத்தி முழுமையான மீக்கடத்தி போலச் செயல்படுகிறது. கடின மீக்கடத்தியில் கலப்புநிலை என்னும் கட்டம் உள்ளது. அதில் மீக்கடத்தி முழுமையான மீக்கடத்திபோல் செயல்படாது.
7. மீக்கடத்திகள் கிரையோட்ரான், செய்தி செலுத்துகை மின்வழிகள், கணிப்பொறிகள் ஆகியவற்றில் பயன்படுகின்றன.
8. தற்போது உயர்வெப்ப மீக்கடத்திகள் கண்டுபிடிக்கப் பட்டுள்ளன. அவை உயர்பெயர்வு வெப்பநிலையைக் கொண்டுள்ளன. அவற்றின் பண்புகளைப் பிசிஎஸ் கொள்கையின் மூலம் விளக்க முடியாது.

வினாக்கள்

1. மீக்கடத்துகைப் பற்றி ஒருகட்டுரை வரைக.
2. மெயிஸ்னர் விளைவு என்றால் என்ன? மீக்கடத்துகைப் பற்றி பிசிஎஸ் கொள்கையைச் சுருக்கமாகக் கூறுக.
3. சிறுகுறிப்பு வரைக:

   அ) மீக்கடத்துகை
   ஆ) மீக்கடத்துகையில் ஐசோடோப்புகளினால் ஏற்படும் மாற்றங்கள்
   இ) மாறுநிலைக்காந்தப்புலம்
   ஈ) கிரையோட்ரான்
   உ) உயர் வெப்ப மீக்கடத்திகள்.

மேற்கோள் நூற்பட்டியல் :

1. 'Superconductors – Conquering Technology's New Frontier' – Randy Simon and Andrew Smith, Plenum Press, New York, 1988.
2. 'Physics of High Tc Superconductors' – J.C. Phillips, Acadamic Press, Canada, 1989.

9. குறைகடத்திகள்

9.1 அறிமுகம்

குறைகடத்தி என்றாலே மின்கடத்தாப் பொருள்களைவிட மிகுந்த கடத்தும் திறனையும், ஆனால் உலோகங்கள் போன்ற கடத்திகளைவிடக் குறைந்த கடத்தும் திறனையும் உடைய பொருள் என்று பொருள்படும். நான்காம் அத்தியாயத்தில் கடத்திகளுக்கும், குறைகடத்திகளுக்கும், கடத்தாப் பொருள்களுக்கும் இடையே உள்ள வேறுபாடுகளைக் கண்டோம். பொதுவாக ஜெர்மேனியம், சிலிக்கான் ஆகிய இரு தனிமங்கள்தான் குறைகடத்திக் கருவிகளில் மிகவும் பயன்படும் பொருள்களாகும். இவற்றின் மின்கடத்துந்திறன் அறை வெப்பநிலையில் ஏறத்தாழ 2 மோ/மீ என்னும் அளவில் இருக்கும். அதே நேரத்தில் கடத்தியான தாமிரத்திற்குக் கடத்துந்திறன் 5×10^7 மோ/மீ ஆகும். இதேபோல் கண்ணாடியின் கடத்துந்திறன் 10^{-10} மோ/மீ என்னும் அளவிற்கும் குறைவாயிருக்கலாம். மின்னியலிலும், மின்னணுவியலிலும் குறைகடத்திக்கருவிகள் மிகமுக்கியப் பங்கு வகிக்கின்றன. குறிப்பாய் மின்னணுவியல் துறையில் 1948இல் டிரான்சிஸ்டர் கண்டுபிடிக்கப்பட்டபிறகு அதுவரை நடைமுறையில் இருந்த வெற்றிடக் குழல்களை (vaccum tubes) முற்றிலும் நீக்கிக் குறைகடத்திக் கருவிகள் பயன்படுத்தப்பட்டன. டிரான்சிஸ்டர் அமைப்புகளை உருவாக்கியதில் பெரும்பங்கு, பெல் தொலைபேசி ஆய்வுக் கூடத்தைச் சேர்ந்த ஜான்பார்டீன், பிராட்டைன், வில்லியம் ஷாக்லீ போன்ற அறிவியல் மேதைகளைச் சார்ந்தது. இதற்காக இவர்களுக்கு 1956 ஆம் ஆண்டு நோபல்பரிசு கிடைத்தது.

ஒருகுறைகடத்தி டயோடு வெற்றிடக் குழல் டயோடுக்கு (vaccum tube diode) ஒப்பாகும். இதேபோல் ஒருடிரான்சிஸ்டர், டிரையோடு (triode) என்னும் வெற்றிடக் குழலுக்கு ஒப்பாகும். எனினும் குறைகடத்திக் கருவிகளை வெற்றிடக் குழல்களோடு ஒப்புநோக்கக் குறைகடத்திக்கருவிகள் வடிவத்தில் மிகச்சிறியனவாயிருக்கின்றன. அதனால், குறைகடத்திக் கருவிகளால் செய்யப்பட்ட மின்னணுவியல் கருவிகளின் பருமனும், அவற்றின் எடையும் மிகக் குறைவாயுள்ளன. மேலும், குறைகடத்திக் கருவிகள் மிக உயர்ந்த செயல்திறன்மிக்கவை. மிகஅதிக உயர்அதிர்வெண்களில் கூட டிரான்சிஸ்டரைப் பயன்படுத்தலாம். ஆனால், இந்த அதிர்வெண்களில் வெற்றிடக் குழல்களைப் பயன்படுத்த முடியாது. வெற்றிடக் குழல்களில் வெற்றிடம் இன்றியமையாத ஒன்றாகும். ஆனால், திடப்பொருள்களான குறைகடத்திக்கருவிகளுக்கு வெற்றிடம் ஏதும் தேவையில்லை. வெற்றிடக் குழல்களில் ஏறத்தாழப் பாதிக்கு மேலான ஆற்றல் மின்னிழைகளை (filaments)ச் சூடாக்குவதிலேயே செலவழிந்து விடுகிறது. இங்கு அவ்விதமான திறனிழப்பு ஏதும் இல்லை. இக்காரணங்களால் இன்று குறைகடத்திக் கருவிகள், மிகுந்தளவு முக்கியத்துவம் பெற்று வருகின்றன. மேலும் குறைகடத்திகளாலான தொகுநிலைச் சுற்றுகள் (Integrated Circuits) மின்னணுவியலில் பலமாறுதல்களை ஏற்படுத்தி வருகின்றன.

9.2 குறைகடத்திகளின் இயற்பியல் குணங்கள்

ஜெர்மேனியமும், சிலிக்கானும் டையோடுகள், டிரான்சிஸ்டர்கள் செய்ய மிகுதியாய்ப் பயன்படுத்தப்படுகின்றன. இவை தவிரத் தனிம அட்டவணையில் உள்ள போரான் (B), ஆர்சினிக் (As), கந்தகம் (S), பாஸ்பரம் (P), டெல்லூரியம் (Te), வெள்ளீயம் (Sn), அயோடின் (I), செலீனியம் (Se) போன்றவைகளும் குறைகடத்திகளாகும். இவற்றைத் தனிமநிலைக் குறைகடத்திகள் என்பர். மேலும், சேர்ம நிலையிலும் குறைகடத்திகள் உள்ளன. குறிப்பாய் ஒளிமின் பெருக்கியில் (photomultiplier) பயன்படும் சீசியம் ஆண்டிமோனைடும், ஒளிகடத்து கலங்களில் (photoconductive cells) பயன்படும் காட்மியம் சல்பைடும், பேரியம் ஆக்சைடும் சேர்ம நிலையிலுள்ள குறைகடத்திகளாகும். இவற்றில் மிகமுக்கியமாய்ப் பயன்படும் ஜெர்மேனியம், சிலிக்கான் பற்றிச் சற்று விரிவாய்க் காண்போம். இந்தத் தனிமங்கள் தனிம அட்டவணையில் நான்காம் பிரிவில் அமைந்திருக்கின்றன. தனிம அட்டவணையில் நான்காம் பிரிவில் உள்ள தனிமங்கள்

அட்டவணை 9.1

ஜெர்மேனியம், சிலிக்கான் ஆகியவற்றின் இயற்பியற் குணங்கள்.

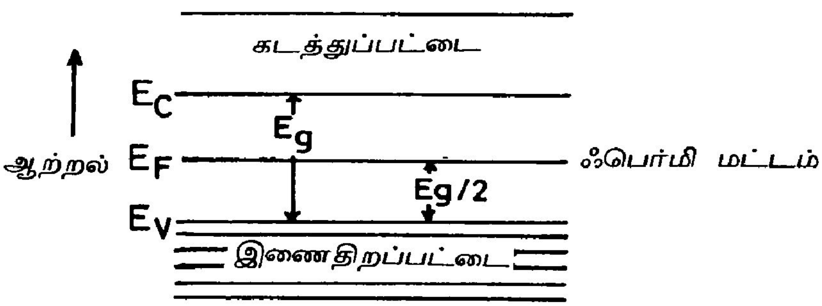
இயற்பியற் குணம்	ஜெர்மேனியம்	சிலிக்கான்
அணுஎண்	32	14
அணுஎடை	72.6	28.1
அடர்த்தி (கிலோ கிராம்/மீ^{3})	5320	2330
மின் கடத்தாப் பொருள் மாறிலி 'ε_r'	16	12
அணுச்செறிவு (அணுக்கள்/மீ^{3})	4.4×10^{28}	5.0×10^{28}
சுழி கெல்வின் வெப்பநிலையில் விலக்கப்பட்ட ஆற்றல் இடைவெளி 'E_g' (எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு)	0.72	1.1
300 கெல்வினில் மின்னூட்டக் கடத்திகளின் செறிவு 'n_i' (மீ$^{-3}$)	2.5×10^{19}	1.5×10^{16}
300 கெல்வினில் மின்எதிர்ப்புத் திறன் 'ρ' (ஓம் மீட்டர்)	0.45	2300
300 கெல்வினில் எலெக்ட்ரானின் நகர்வுதிறன் 'μ_n' (மீ^{2}/வோல்ட்- செகண்டு)	0.38	0.13
300 கெல்வினில் துளையின் நகர்வுதிறன் 'μ_p' (மீ^{2}/வோல்ட்- செகண்டு)	0.18	0.05
எலெக்ட்ரானின் விரவல் மாறிலி 'D_n' (மீ^{2}/செகண்டு)	0.0099	0.0034
துளையின் விரவல் மாறிலி 'D_p' (மீ^{2}/செகண்டு)	0.0047	0.0013

எல்லாம் நான்கு இணைதிற எலெக்ட்ரான்களை வெளிகூட்டில் பெற்றிருக்கும். இந்த நான்கு இணைதிற எலெக்ட்ரான்களுள் ஒவ்வொன்றும் அடுத்துள்ள அணுவின் இணைதிற எலெக்ட்ரான்களில் ஒன்றோடு சக பிணைப்பினை ஏற்படுத்திக் கொண்டிருக்கும். ஆகவே, ஒவ்வொரு அணுவும் அதனைச் சுற்றியுள்ள நான்கு எலெக்ட்ரான்களோடு சகபிணைப்பினை ஏற்படுத்திக்கொண்டிருக்கின்றது.

மேலும், ஜெர்மேனியமும் சிலிக்கானும் வைரத்தின் படிக அமைப்பினைக்கொண்டுள்ளன. இவை இரண்டும் கடினமான பொருள்களாய் இருந்தாலும், எளிதாய் நொறுங்கும் தன்மை உடையவை. ஜெர்மேனியம், சிலிக்கான் ஆகியவற்றில் வைரத்தின் படிக அமைப்பு இருப்பதாலும், சக பிணைப்பும் உள்ளதாலும் எலெக்ட்ரான்கள் இடம்விட்டு இடம்நகர முடியாது. இத்தகைய அமைப்பு மிகமிக நிலையானது. இப்படிக அமைப்பின் குறுக்கே ஒருமின்னழுத்தவேறுபாடு அமைக்கப்பட்டால் மின்னோட்டம் ஏதும் பாயாது. ஏனெனில், இதில் மின்னோட்டத்தைக் கடத்துதற்குரிய கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்கள் ஏதுமில்லை. அதனால், ஜெர்மேனியமும் சிலிக்கானும் சுழி கெல்வின் வெப்பநிலையில் நல்ல மின்காப்புப் பொருள்களாய் அல்லது மின்கடத்தாப் பொருள்களாய் செயல்படுகின்றன. ஆனால், வெப்பநிலை படிப்படியாய் உயர்த்தப்பட்டால் சில எலெக்ட்ரான்கள் சகபிணைப்பிலிருந்து விடுபட்டுத் **தன்னியல்பு** அல்லது **கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களாய்** (free electrons) மாறுகின்றன. அதனால் வெப்பநிலை உயரும்போது குறைகடத்தியின் கடத்துந்திறனும் உயருகிறது. ஒரு சக பிணைப்பிலிருந்து ஓர்எலெக்ட்ரான் விடுபட்டுவிட்டால் அது இருந்த இடம் காலியாயிருக்கும். பட்டைக் கொள்கை (band theory)ப்படி இந்தக் காலியான இடம் **துளை** (hole) எனப்படும். எலெக்ட்ரான் ஓர்எதிர்மின்னூட்டத்தைப் பெற்றிருக்கிறது. எனவே ஒரு துளை, நேர்மின்னூட்டத்தைப் பெற்ற துகளாய் மின்புலத்தில் இயங்கும் என்று எடுத்துக் கொள்ளப்படுகிறது. அட்டவணை 9.1இல் ஜெர்மேனியம், சிலிக்கான் ஆகியவற்றின் இயற்பியற் குணங்கள் தரப்பட்டுள்ளன.

9.3 இயல்பான அல்லது மாசற்ற குறைகடத்தி (Intrinsic Semiconductor)

மேலே கூறப்பட்ட ஜெர்மேனியமும் சிலிக்கானும் இயல்பான அல்லது மாசற்ற குறைகடத்திகளாகும். ஒருகுறைகடத்தியில் துளைகளும், கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களும் வெப்பநிலை உயர்வால்மட்டும் தோற்றுவிக்கப்பட்டால் அது மாசற்ற குறைகடத்தியாகும்.



படம் 9.1 இயல்பான குறைகடத்தியின் ஆற்றல் மட்டங்கள்

"மாசற்ற" என்பதற்குப் பொருள், வேற்றுப்பொருள் அணுக்கள் ஏதும் அதனில் இல்லை என்பதாகும்; இதனைத் தூய குறைகடத்தி எனவும் கூறலாம். வெப்பக் கிளர்ச்சியால் இணைதிறப்பட்டையிலிருந்து கடத்துப் பட்டையை அடையும் எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை இணைதிறப் பட்டையிலுள்ள காலி இடங்கள் அல்லது துளைகளுக்குச் சமமாகும்.

அஃதாவது, இயல்பான குறைகடத்தியில் கடத்துப் பட்டையிலுள்ள எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கையும் இணைதிறப்பட்டையிலுள்ள துளைகளின் எண்ணிக்கையும் எப்பொழுதும் சமமாயிருக்கும். அதேபோல் ஃபெர்மி ஆற்றல்மட்டமும் ஓர்இயல்பான குறைகடத்தியில் விலக்கப்பட்ட ஆற்றல் இடைவெளி நடுவில் அமைந்திருக்கும் (படம் 9.1). இவ்வகைக் குறைகடத்திகளில் வெப்பநிலை மிக, எலெக்ட்ரான்களின் செறிவும், துளைகளின் செறிவும் கூடும். ஆனால், ஒரு குறிப்பிட்ட வெப்பநிலையில் எலெக்ட்ரான்களின் செறிவும் துளைகளின் செறிவும், சமமாய் இருக்கும். ஓர் இயல்பான குறைகடத்தி நடைமுறையில் அவ்வளவு முக்கியத்துவம் வாய்ந்ததில்லை. ஏனெனில், அதன் கடத்துந்திறன் (conductivity), மிகமிகக் குறைவானது. மேலும், அக் குறைந்த கடத்துந்திறனும் மாறும்தன்மையுடையது. இவ்விரண்டு பண்புகளும் இவற்றை நடைமுறைக்கு ஒவ்வாதனவாய் ஆக்கிவிடுகின்றன.

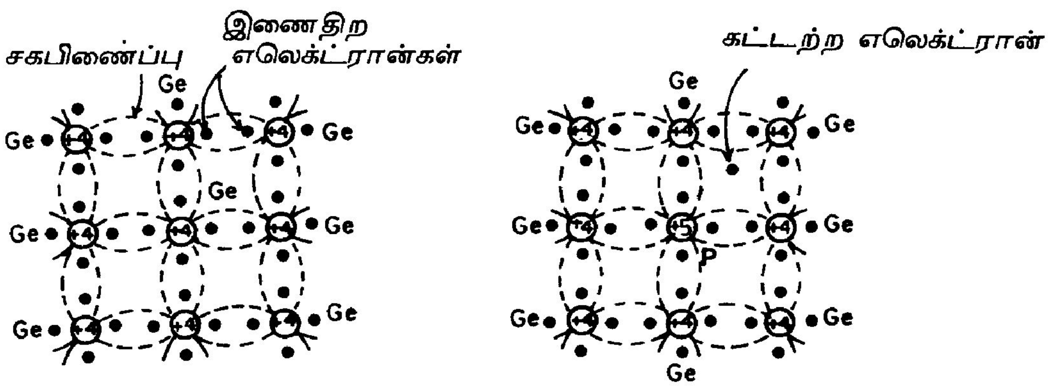
9.4 புறவியலான அல்லது கலப்புக் குறைகடத்தி (Extrinsic Semiconductor)

ஒரு குறைகடத்தியில் மின்னூட்டக் கடத்திகள், அதில் சேர்க்கப்பட்ட வேற்றுப்பொருள் அணுக்களிலிருந்து தோன்றுமானால் அதனைப் புறவியலான அல்லது கலப்புக் குறைகடத்தி என்பர். இவற்றின் மின்கடத்துந்திறன் அவற்றினுள் சேர்க்கப்பட்ட வேற்றுஅணுக்களைப் பொறுத்துள்ளது. மேலும், இந்த வேற்றணுக் கலப்பினால் மின்கடத்துந்திறன் மிகுதியாகிறது. இத்தகைய வேற்றணுக்கள் தேர்ந்தெடுக்கப்பட்டனவாய் உரிய தன்மையுடையனவாய் இருத்தல் வேண்டும். இவற்றை ஒருகுறிப்பிட்ட அளவுதான் குறைகடத்திப் பொருளில் கலக்க வேண்டும். அப்போதுதான் இவை குறைகடத்தியின் மின்கடத்துந்திறனை ஒருகுறிப்பிட்ட வெப்பநிலையில் மாற்றி அமைக்கும்.

மின்கடத்துந்திறனை வேண்டிய அளவிற்கு மிகுவிக்கத் தேவைப்படும் வேற்றுணுக்கள் மிகமிகக் குறைந்த அளவேயாகும். ஏறத்தாழ ஒருமில்லியன் தூய குறைகடத்தி அணுக்களுக்கு ஒருவேற்றுப் பொருள் அணுவீதம் கலக்கப்படுகிறது. ஜெர்மேனியமும், சிலிக்கானும் நான்கு இணைதிறன் கொண்டன. வேற்றணுக்கள் ஐந்து இணைதிறன் அல்லது மூன்று இணைதிறன் கொண்டனவாயிருக்கலாம். அஃதாவது, தனிம அட்டவணையின் ஐந்தாம் பிரிவிலோ (group), அல்லது மூன்றாம் பிரிவிலோ உள்ள அணுக்களை வேற்று அணுக்களாய் பயன்படுத்தலாம். இந்த வேற்றணுக்களை அவற்றின் செயலின் அடிப்படையில் இருபகுதிகளாய்ப் பிரிக்கலாம்: (அ) கொடை அணுக்கள் அல்லது N வகை அணுக்கள்; (ஆ) ஏற்பு அணுக்கள் அல்லது P வகை அணுக்கள். ஐந்து இணைதிறனைக் கொண்ட அணுக்கள் கொடை அணுக்களாயும் (donor atoms), மூன்று இணைதிறனைக் கொண்ட அணுக்கள் ஏற்புஅணுக்களாயும் (acceptor atoms) செயல்படுகின்றன.

(அ) N வகைக் குறைகடத்திகள் :

தூய குறைகடத்தி அணுவின் இணைதிறனைவிட அதனோடு கலக்கப்படும் வேற்று அணுவின் இணைதிறன் மிகுதியாயிருந்தால் அந்த வேற்றுப்பொருள் கலந்த குறைகடத்தியை N வகைக் குறைகடத்தி என்பர். அதனால், ஜெர்மேனியம், சிலிக்கான் ஆகியவற்றில் பாஸ்பரஸ், ஆண்டிமொனி, ஆர்சினிக், பிஸ்மத் போன்ற ஏதாவதோர் ஐந்து இணைதிறன் கொண்ட வேற்றுஅணுவைக் கலந்தால், கலக்கப்பட்ட ஜெர்மனியமோ, சிலிக்கானோ ஒருகொடைவகை அல்லது N வகை குறைகடத்தி எனப்படும்.



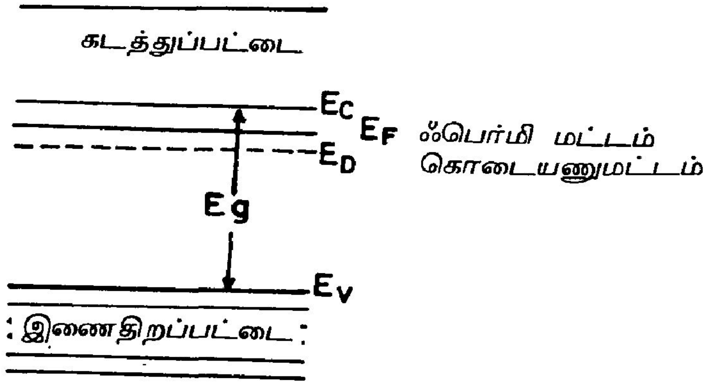
(அ) ஜெர்மேனியப்படிகம் (ஆ) ஜெர்மேனியப்படிகத்தில் பாஸ்பர அணு

படம் 9.2 ஜெர்மேனியப்படிகமும், அதில் கொடையணுவான பாஸ்பரமும், அதனால் ஏற்படும் எலெக்ட்ரானும்.

ஜெர்மேனிய அணுக்களைப் போலவே இந்த வேற்றுணுக்களின் அளவும் ஏறத்தாழச் சமமாயிருக்கிறது. அதனால், இந்த வேற்றுணுக்கள் ஒவ்வொன்றும் படிக அணிக்கோவையிலிருந்து ஒருஜெர்மேனிய அணுவினை வெளியேற்றிவிட்டு, அஃது அமர்ந்துகொள்கிறது. இந்த வேற்றணுக்களின் எண்ணிக்கை மிகக்குறைவாயிருப்பதால் பொதுவாய் ஓர் அணிக்கோவையில் அஃது அமர்ந்தவுடன் அதனைச்சுற்றி ஜெர்மேனிய அணுக்களே இருக்கும். அதனால், ஒவ்வொரு வேற்றணுவினைச்சுற்றியும் சம தொலைவுகளில் நான்கு ஜெர்மேனிய அணுக்கள் இருக்கும். இந்த ஐந்து இணைதிறன் கொண்ட வேற்றணுவில் ஐந்து இணைதிறஎலெக்ட்ரான்கள் இருக்கும். இவற்றைக்கொண்டு வேற்றணு, அதனைச் சுற்றியுள்ள ஜெர்மேனிய அணுக்களுடன் இரட்டை எலெக்ட்ரான்களையுடைய சகப்பிணைப்பினை அமைத்துக்கொள்கிறது. மொத்த இணைதிற எலெக்ட்ரான்களான

ஐந்தில் நான்கு மட்டும் சுற்றியுள்ள நான்கு ஜெர்மேனிய அணுக்களின் இணைதிறஎலெக்ட்ரான்களோடு இணைந்து சகப்பிணைப்பினை அமைத்துக்கொண்டு விடுகின்றன. அதனால், ஒவ்வொரு வேற்றணுவிலும் மீதமுள்ள ஐந்தாம் இணைதிறஎலெக்ட்ரான் மட்டும் தனித்துவிடப்படுகிறது. இஃது இந்த வேற்றணுவோடு எளிய பிணைப்பினைத்தான் கொண்டிருக்கும். மிகக் குறைந்த ஆற்றலைச் செலவழித்து இந்த எலெக்ட்ரானை அந்த அணுவிலிருந்து விடுவித்துவிடலாம். ஆர்சினிக் அணுவினை ஜெர்மேனியத்தோடும், சிலிக்கானோடும் கலக்கும்போது இந்த விடுவிக்கும் ஆற்றல் முறையே 0.01 எலெக்ட்ரான் வோல்ட், 0.05 எலெக்ட்ரான்வோல்ட் ஆகும். அதே சமயம் ஒரு சக பிணைப்பினை உடைத்து அதிலிருந்து எலெக்ட்ரானை விடுவிக்கத் தேவையான ஆற்றல் 0.75 எலெக்ட்ரான்வோல்ட் ஆகும். அதனால், ஐந்தாம் இணைதிறஎலெக்ட்ரானை விடுவிக்கத் தேவையான ஆற்றலை, சகபிணைப்பினை உடைப்பதற்குத் தேவையான ஆற்றலோடு ஒப்பிடும்போது அது மிகக் குறைந்த அளவேயாகும். குறிப்பாய் அறைவெப்பநிலையில் வெப்பக் கிளர்ச்சியினால் ஐந்தாம் இணைதிறஎலெக்ட்ரான்கள் வேற்றணுக்களிலிருந்து விடுவிக்கப்படுகின்றன. இவ்வாறு விடுவிக்கப்பட்ட இணைதிறஎலெக்ட்ரான், படிக அணிக்கோவையில் எங்கும் நகர்ந்துசெல்லக் கூடிய தன்னியல்பு கொண்டதாயிருக்கும். அஃதாவது, இதன் இயக்கம், கடத்திகளிலுள்ள கட்டற்ற எலெக்ட்ரானின் இயக்கத்திற்கு ஒப்பானதாகும். படம் 9.2ல் ஒரு பாஸ்பரஅணு நான்கு ஜெர்மேனிய அணுக்களுக்கு இடையே அமர்ந்திருப்பது காட்டப்பட்டுள்ளது. ஒவ்வொரு ஜெர்மேனிய அணுவின் இணைதிறஎலெக்ட்ரானும் பாஸ்பர அணுவின் இணைதிறஎலெக்ட்ரானோடு பகிர்ந்து சக பிணைப்பினை ஏற்படுத்திக் கொள்கிறது. பாஸ்பர அணுவின் ஐந்தாம் இணைதிறஎலெக்ட்ரான்மட்டும் தனித்துவிடப்பட்டிருப்பதைப் படத்தில் காணலாம். இஃது எந்தவொரு பிணைப்பிற்கும் உட்படாமல் படிக அணிக்கோவையினூடே தன்னிச்சையாயியங்கிச் செல்லும் இயல்பினைக் கொண்டிருக்கிறது. இவ்வாறு ஒவ்வொரு பாஸ்பர அணுவும் ஒரு கட்டற்ற எலெக்ட்ரானைக் கொடையாய் அளிக்கிறது. அதனால், அதனை ஒருகொடையணு (donor atom) என்பர். இந்தக் கொடை அணுக்களைத் தன்னுள் கொண்டுள்ள குறைகடத்திப் பொருள் கொடைவகைக் குறைகடத்தி எனப்படும். மேலும், இக்கொடை அணுக்களால் மிகுதியாய் எதிர்மின்னூட்டங்கொண்ட எலெக்ட்ரான்கள் தோன்றுவதால் இதனை N வகைக் குறைகடத்தி என்றும் கூறுவர். அதனால், இதில் எலெக்ட்ரான்கள் பெரும்பான்மை (majority) மின்னூட்டக் கடத்திகளாயும், துளைகள் சிறுபான்மை (minority) மின்னூட்டக் கடத்திகளாயும் இருக்கும். ஒவ்வொரு கொடை அணுவும் சகபிணைப்பில் பங்கெடுக்காமல் மீந்த, தன்னிடமுள்ள ஓர் எலெக்ட்ரானைக் கொடுத்துவிடுவதால் அது +1 நேர்மின்னூட்டம் கொண்ட அயனியாயிருக்கும். எனினும், இஃது அணிக்கோவையில் சகபிணைப்பினால் நகரமுடியாது பிணைக்கப்பட்டிருக்கும். அதனால், இது "நகரா மின்னூட்டம் (immobile charge)" அல்லது "பிணைக்கப்பட்ட மின்னூட்டம் (bound charge)" எனப்படுகிறது. இந்தக் கொடையணுவால் கொடுக்கப்பட்ட எலெக்ட்ரான் "நகரும் மின்னூட்டம் (mobile charge)" அல்லது "கடத்து எலெக்ட்ரான் (conduction electron)" எனப்படும். வெப்பநிலை உயரஉயரச் சகபிணைப்புகள் உடைந்துகொண்டே போவதாலும், அநேக கடத்து எலெக்ட்ரான்கள் கிடைக்கும். அறைவெப்பநிலையில் (300 கெல்வின்) ஜெர்மேனியத்தில் வெப்ப எழுச்சியால் (thermal

agitation) பிணைப்பு உடைந்து, விடுபடும் எலெக்ட்ரான்களின் செறிவு 2.5×10^{19}மீ$^{-3}$ இருக்கும். கொடையணுக்களின் செறிவு ஒருகனமீட்டரில் மேற்கண்ட மதிப்பினைவிட மிகுதியாயிருந்தால் அஃது ஒரு N வகைக் குறைகடத்தியாய்ச் செயல்படும். இம்மதிப்பைவிட மிகமிகக் குறைவாய்க் கொடையணுக்களின் செறிவு இருந்தால், அது தூய அல்லது மாசற்ற குறைகடத்தியாய்ச் செயல்படும்



படம் 9.3 N வகைக் குறைகடத்தியின் ஆற்றல் மட்டங்கள்.

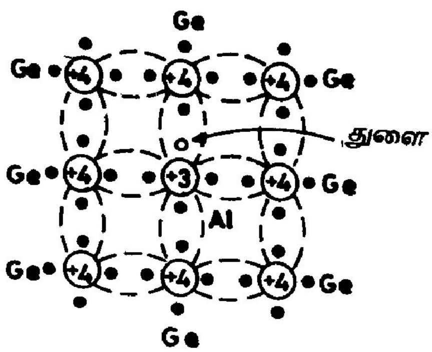
கிளர்ச்சியினால் இணைதிறப்பட்டையிலிருந்து எலெக்ட்ரான்கள் விலக்கப்பட்ட ஆற்றல் இடைவெளியைக் கடந்து, கடத்துப்பட்டையை அடையுமுன், கொடையணுமட்டங்களில் உள்ள எலெக்ட்ரான்கள் கடத்துப் பட்டையை அடைகின்றன. ஏனெனில், கொடையணு ஆற்றல் மட்டம் கடத்துப் பட்டைக்கு மிகஅருகில் உள்ளது (படம் 9.3). எனவே அறைவெப்பநிலையில் கொடையணு ஆற்றல் மட்டத்தில் உள்ள எலெக்ட்ரான்கள் கடத்துப் பட்டைக்கு வந்தடைந்துவிடுகின்றன. அதனால், எலெக்ட்ரான்கள் பெரும்பான்மை மின்னூட்டக் கடத்திகளாய்ச் செயல்படுகின்றன.

(ஆ) P வகை அல்லது ஏற்பு வகைக் குறைகடத்தி :

தூய குறைகடத்தியின் இணைதிறனைவிடக் கலக்கப்படும் வேற்றணுக்களின் இணைதிறன் குறைவாயிருந்தால் அஃது ஓர்ஏற்புவகை அல்லது 'P' வகைக் குறைகடத்தி ஆகும். மூன்று இணைதிறன் கொண்ட போரான், கேலியம், இண்டியம், அலுமினியம் ஆகிய தனிமங்களில் ஏதாவதொரு தனிம அணுக்களை ஜெர்மனியம், சிலிக்கான் ஆகியவற்றில் சேர்க்கும்பொழுது அவை 'P' வகைக் குறைகடத்திகளாய் மாறுகின்றன.

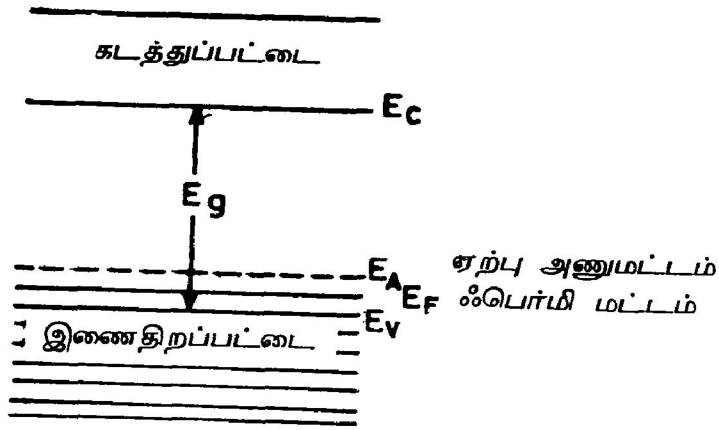
ஜெர்மேனிய அணுவின் அளவும், மூன்று இணைதிறன் கொண்ட அணுவின் அளவும் ஏறத்தாழச் சமமாயிருக்கின்றன. முன்பு N வகைக் குறைகடத்திகளில் கூறியபடியே இங்கும் வேற்று அணுக்களான மூன்று இணைதிறன் கொண்ட அணுக்கள், ஜெர்மேனிய அணுக்களை அவற்றின் அணிக்கோவையிலிருந்து வெளியேற்றிவிட்டுத் தாங்கள் அந்த இடங்களில் அமர்ந்துகொள்கின்றன. ஒவ்வொரு வேற்று அணுவினைச் சுற்றியும், நான்கு ஜெர்மேனிய அணுக்கள் சமதொலைவில் அமைந்திருக்கின்றன. ஏனெனில், வேற்று அணுக்கள், 10^6 ஜெர்மேனிய அணுக்களுக்கு ஓர் அணுவீதம் கலக்கப்படுகின்றன. படம்

9.4-ல் காட்டியுள்ளபடி ஒவ்வொரு ஜெர்மேனிய அணுவும் நான்கு சக பிணைப்பினை அமைத்துக் கொள்கின்றது. ஆனால், மூன்று இணைதிறன் கொண்ட அலுமினிய அணுவிடம் மூன்று இணைதிறஎலெக்ட்ரான்களே உள்ளன; அதனால், அது நான்கு சகபிணைப்பினை ஏற்படுத்திக் கொள்ள ஓர்எலெக்ட்ரான் குறைகிறது. அதனால், இந்த அலுமினிய அணு அடுத்துள்ள பகுதிகளிலிருந்து ஓர் எலெக்ட்ரானை எடுத்துக்கொள்ள ஒரு வாய்ப்பினை எதிர்நோக்கும். வெப்ப எழுச்சியால் அடுத்துள்ள ஜெர்மேனிய அணுவின் சகபிணைப்பிலிருந்து விடுபட்டு ஓர் எலெக்ட்ரான் இந்த அணுவின் அருகே வர வாய்ப்புண்டு. அங்ஙனம் ஒரு ஜெர்மேனிய அணுவின் எலெக்ட்ரான், அலுமினிய அணுவின்



படம் 9.4 ஜெர்மேனியப் படிகத்தில் ஏற்பு அணுவும், அதனால் ஏற்படும் துளையும்.

அருகில் வந்தவுடன் அதனைப் பிடித்துக்கொண்டு நான்கு சகபிணைப்பினை அமைத்துக்கொள்ளும். இவ்வாறு எலெக்ட்ரானைப் பிடிக்க அலுமினிய அணுவிற்குத் தேவையான ஆற்றல் மிகக்குறைவேயாகும். அஃதாவது, அலுமினிய அணு பயன்படுத்தப்படும்பொழுது ஜெர்மேனியத்திலும், சிலிக்கானிலும் அவ்வாற்றல் முறையே 0.01, 0.06 எலெக்ட்ரான் வோல்ட்களாகும். அறைவெப்பநிலையில் இக்குறைந்த ஆற்றல், வெப்ப எழுச்சியால் மிக எளிதாய்க் கிடைக்கும். அடுத்துள்ள ஜெர்மேனிய அணுவிலிருந்து அலுமினிய அணு ஓர் எலெக்ட்ரானை எடுத்துக் கொண்டால், ஜெர்மேனிய அணுவில் ஒருகாலியிடம் அல்லது துளை தோன்றியிருக்கும். இந்தத் துளை அணிக்கோவையினூடே வெப்ப எழுச்சியால் அங்குமிங்கும் ஒழுங்கற்றுத் தன்னிச்சையாய் நகரும். இந்தத் துளையின் இயக்கம் சகபிணைப்பு உடைப்பால் தோன்றும் துளையின் இயக்கத்தை ஒத்திருக்கும். அதே சமயம், அலுமினிய அணு ஒருகூடுதல் எலெக்ட்ரானைப் பெறுவதால் அஃது எதிர்க்குறி அயனியாய் மாறி, நகர முடியாதவாறு அணிக்கோவையில் நிலைநிறுத்தப்படுகிறது. அறைவெப்ப நிலையில் வெப்ப எழுச்சியால் சக பிணைப்புகள் உடையத் தோன்றும் துளைகளின் செறிவைவிட (2.5×10^{19} மீ$^{-3}$) ஏற்பு அணுக்களின் செறிவு மிகுதியாயிருந்தால் அஃது ஒரு P வகைக் குறைகடத்தி எனப்படுகிறது. ஏற்பு அணுக்களின் செறிவு இம்மதிப்பினைவிட மிகக் குறைவாயிருந்தால் அதனைத்தூய குறைகடத்தி என்றே சொல்லலாம்.



படம் 9.5 P வகைக் குறைகடத்தியின் ஆற்றல் மட்டங்கள்

கிளர்ச்சியினால் இணைதிறப்பட்டையிலிருந்து எலெக்ட்ரான்கள் விலக்கப்பட்ட ஆற்றல் இடைவெளியைக் கடந்து கடத்துப் பட்டையை அடையுமுன் ஏற்புஅணுமட்டங்களில் உள்ள துளைகள் அவைகளைக் கவர்கின்றன. ஏனெனில், ஏற்புஅணு ஆற்றல்மட்டம் இணைதிறப் பட்டைக்கு மிகஅருகில் உள்ளது. எனவே ஏற்புஅணு ஆற்றல் மட்டத்தில் உள்ள துளைகள் அனைத்தும் அறைவெப்பநிலையில் இணைதிறப்பட்டையிலுள்ள எலெக்ட்ரான்களைக் கவர்ந்துவிடுகின்றன. அதனால், இணைதிறப்பட்டையில் மிகுதியான துளைகள் தோன்றி, அவைகளே பெரும்பான்மை மின்னூட்டக்கடத்திகளாய்ச் செயல்படுகின்றன.; எலெக்ட்ரான்கள் சிறுபான்மை மின்னூட்டக் கடத்திகளாகும். துளைகள் நேர்மின்னூட்டம் பெற்றிருப்பதால் இவ்வகைக் குறைகடத்திகளை P வகைக் குறைகடத்திகள் எனக் கூறுகிறோம்.

அதனால், 'P' வகைக் குறைகடத்திகளிலும் 'N' வகைக் குறைகடத்திகளிலும், எலெக்ட்ரான்களின் செறிவும், துளைகளின் செறிவும், தூய குறைகடத்தியிலுள்ளது போல் சமமாய் இல்லாமல் வேறுபட்ட செறிவுகளில் இருக்கின்றன.

9.5 ஆற்றல் நிலைகளின் அடர்த்தி (density of states)

ஆற்றல் நிலைகளின் அடர்த்தி, G(E) dE என்பது ஓரலகு பருமனில் ஆற்றல் மட்டங்களான E-க்கும், $E+dE$–க்கும் இடையில் கிடைக்கும் மொத்த ஆற்றல் நிலைகளாகும். முதலில் ஆற்றல் மட்டத்திற்கும், ஆற்றல் நிலைக்கும் உள்ள வேறுபாட்டை ஓர் எளிய உதாரணத்தின் மூலம் அறியலாம். ஓர் அணுவில் ஒரு குறிப்பிட்ட ஆற்றல் மட்டத்தில் உள்ள ஆற்றல் நிலைகளின் எண்ணிக்கை, ஒரு குறிப்பிட்ட முதன்மைக்கவள எண் 'n'க்கு மற்றைய கவள எண்களான கோணஉந்தகவள எண் 'l', காந்த கவள எண் 'm' ஆகியவற்றின் அனுமதிக்கப்பட்ட மதிப்புகளின் தொகுதி அல்லது நிலைகளின் எண்ணிக்கை எத்தனை என்பதைப் பொருத்தது. உதாரணமாக $n=2$ என்ற ஆற்றல் மட்டத்திற்கு, (0, 0), (1, – 1), (1, 0), (1, 1) என்ற நான்கு ஆற்றல் நிலைகள் கிடைக்கும். இவற்றில் (0, 0) என்பது s நிலை என்றும், மற்றவை p நிலைகளும் ஆகும். மேற்கண்ட நான்கு ஆற்றல் நிலைகளும் (energy states) $n=2$ என்ற ஆற்றல்

மட்டத்தில் (energy level) ஒரே ஆற்றல் மதிப்பில் இருக்கும். இதே போல் திண்மத்தின் ஒரு ஆற்றல் மட்டத்தில் பல ஆற்றல் நிலைகள் இருக்க வாய்ப்புண்டு. முன்பே கூறியுள்ளபடி உந்தம் $p=\hbar k$; இதில் '**k**' என்பது அலைவெக்டராகும். 'E' என்ற ஆற்றல்வரை உள்ள மொத்த ஆற்றல் நிலைகளின் எண்ணிக்கை, அலைவெக்டார் **k** யை ஆரமாகக் கொண்ட கோளத்தின் கனஅளவை ஓர் ஆற்றல் நிலையின் கனஅளவால் (அலைவெக்டார் ஆயங்களில்) வகுத்தால் கிடைக்கும். அலை எந்திரவியலின் படி, k–வெளியின் அச்சுக்களான k_x, k_y, k_z ஆகியவைகளின் ஓரலகு மதிப்பு $2\pi/a$ ஆகும். எனவே k– வெளியில் ஓர் ஆற்றல் நிலையின் கன அளவு $=\left(\dfrac{2\pi}{a}\right)^3=\dfrac{8\pi^3}{a^3}=\dfrac{8\pi^3}{V}$. இங்கு 'V' என்பது குறைகடத்தி படிகத்தின் கன அளவாகும். ∴ ஆற்றல் 'E' வரையான ஆற்றல் நிலைகளின் எண்ணிக்கை $=\dfrac{(4/3)\pi k^3}{8\pi^3/V}=\left(\dfrac{4}{3}\right)\pi k^3\, V/8\pi^3$. பௌலியின் தவிர்க்கைத் தத்துவப்படி, ஓர்ஆற்றல் நிலையில் எதிரெதிர் தற்சுழற்சிகளையுடைய இருஎலெக்ட்ரான்கள் மட்டும் இருக்கலாம். அதனால், 'E' என்ற ஆற்றல்வரைஉள்ள ஆற்றல் நிலைகளிலுள்ள மொத்த எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை

$$N=2\times\frac{4}{3}\pi\,k^3\times\frac{V}{8\,\pi^3}=\frac{8\,\pi}{3\,h^3}\,(2mE)^{3/2}\,V \qquad (அ)$$

இதில், $k^3=\dfrac{8\pi^3}{h^3}(2mE)^{3/2}$ ஆகும். ஏனெனில், கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களின் ஆற்றல்

$$`E' =\frac{p^2}{2m}=\frac{h^2\,k^2}{8\,\pi^2\,m}$$

E க்கும் $E+dE$ க்கும் இடையே உள்ள மொத்த எலெக்ட்ரான் எண்ணிக்கையைக் கண்டுபிடிக்க (அ) என்ற சமன்பாட்டை வகையீடு (differentiation) செய்யவேண்டும்.

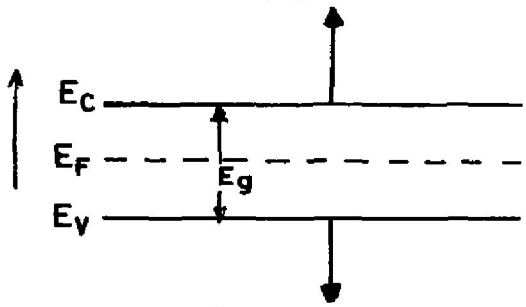
அஃதாவது, $dN=8\,\pi\,m\,\dfrac{(2mE)^{1/2}}{h^3}\,V\,dE=\dfrac{8\pi}{h^3}\,m^{3/2}\,(2E)^{1/2}\,V\,dE$

ஓரலகு பருமனில் மேற்கண்ட dN இன் மதிப்பே எலெக்ட்ரானின் அடர்த்தியாகும். எனவே ஒரு திண்மத்தில், 'E' என்ற ஆற்றல் மட்டத்திற்கும், '$E+dE$' என்ற ஆற்றல்மட்டத்திற்கும் இடையே உள்ள எலெக்ட்ரான்களின் அடர்த்தி $g(E)dE=2\,G(E)\,dE$ ஆகும்.

$$\therefore\, g(E)\,dE=\frac{dN}{V}=\frac{8\pi}{h^3}\,m^{3/2}\,(2\,E)^{1/2}\,dE$$

மேற்கண்ட சமன்பாட்டில் 'E'க்கும், '$E+dE$'க்கும் இடையே உள்ள எல்லா ஆற்றல் நிலைகளிலும் எலெக்ட்ரான்கள் நிரம்பியுள்ளன என்று எடுத்துக்கொள்ளப்பட்டுள்ளது.

9.6 இயல்பான குறைகடத்தியில் மின்னூட்டக் கடத்திகளின் செறிவு (density of charge carriers)



படம் 9.6 இயல்பான குறைகடத்தியின் ஆற்றல் பட்டைகள்

ஒரு குறைகடத்தியில் ஆற்றல் 'E'க்கும், '$E + dE$'க்கும் இடையே கிடைக்கும் மொத்த எலெக்ட்ரான்களின் செறிவு

$$dn = p(E)\, g(E)\, dE \tag{9.1}$$

இதில் $p(E)$ என்பது 'E' என்ற ஆற்றல் மதிப்பை உடைய ஆற்றல் நிலைகள் நிரப்பப்படுவதைக் குறிக்கும் நிகழ்தகவை (probability)க் குறிக்கிறது. கடத்துப் பட்டையில் எல்லா நிலைகளும் ஒரே ஆற்றலில் இராது. கடத்துப் பட்டையில் அடிமட்டத்தில் உள்ள ஆற்றல் E_c ஆகும். அதிலிருந்து அதன் ஆற்றல் மேல்நோக்கி உயர்ந்துகொண்டே செல்கிறது. கடத்துப்பட்டையிலுள்ள எலெக்ட்ரான்களின் செறிவைச் சமன்பாடு (9.1)ஐ தொகையப்படுத்தி (integration)க் கண்டுபிடிக்கலாம். அஃதாவது,

$$n = \int_{E_c}^{\text{பெரும ஆற்றல்}} p(E)\, g(E)\, dE$$

சென்ற பக்கத்தின்படி மின்னழுத்தம் இல்லாத போது எலெக்ட்ரான்களின் செறிவு (ஓரலகு பருமனில் உள்ள மொத்த எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை)

$$g(E)\, dE = \frac{8\pi}{h^3}\, m^{3/2}\, (2E)^{1/2}\, dE \tag{9.2}$$

எனக் கண்டோம். அதே சமயம் ஓர்எலெக்ட்ரான் கடத்துப்பட்டையில் இருக்கும்போது அஃது அணிக்கோவை மின்னழுத்தத்தில் உள்ள எலெக்ட்ரானுக்குச் சமம். அதனால், அதனை மின்னழுத்தத்தில் இல்லா எலெக்ட்ரான்போல் எடுத்துக்கொள்ள, அதன் நிறையான 'm' க்குப் பதிலாய் அதன் செயலுறுநிறை 'm_e^*' ஐ சமன்பாடு (9.2)இல் இடவேண்டும்.

$$\therefore\ g(E)\,dE = \frac{8\,\pi}{h^3}(m_e^*)^{3/2}\,(2E)^{1/2}\,dE \tag{9.3}$$

கடத்துப் பட்டையில் எலெக்ட்ரான்களின் சிறுமஆற்றல் E_c எனக் கொண்டால்,

$$g(E)\,dE = 2^{3/2}\,\frac{4\pi}{h^3}(m_e^*)^{3/2}\,(E-E_c)^{1/2}dE \tag{9.4}$$

ஃபெர்மி-டிராக் பங்கீட்டுச் சார்பின்படி, வெப்பச்சமநிலையில் 'E' ஆற்றலுடைய ஒரு கவள நிலையில் ஓர் எலெக்ட்ரான் இருப்பதற்குரிய நிகழ்தகவு

$$p(E) = \left[\exp\left(\frac{E-E_f}{kT}\right)+1\right]^{-1} \tag{9.5}$$

இதில் E_f என்பது ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டம் ; k என்பது போல்ட்ஸ்மேன் மாறிலி.

$$\therefore\ dn = p(E)\,g(E)\,dE = \frac{\left(\dfrac{4\,\pi}{h^3}\right)(2m_e^*)^{3/2}\,(E-E_c)^{1/2}\,dE}{\exp\left(\dfrac{E-E_f}{kT}\right)+1} \tag{9.6}$$

$$(\text{அல்லது})\ n = \frac{4\,\pi}{h^3}\quad (2\,m_e^*)^{3/2}\int_{E_c}^{\infty}\frac{(E-E_c)^{1/2}\,dE}{\exp\left((E-E_f)/kT\right)+1} \tag{9.7}$$

இதில் தொகையத்தின் பெரும வரம்பாய் (maximum limit) வரையிலி ஆற்றல் எடுத்துக்கொள்ளப்பட்டுள்ளது. இவ்வாறு எடுத்துக்கொள்வதால் தொகையத்தை எளியதாய்த் தீர்த்து விடலாம். மேலும், இவ்வாறு எடுத்துக் கொள்ளப்பட்டுவரும் தொகையத்தின் மதிப்பிற்கும், பெரும வரம்பாக மெய்யான ஆற்றலை எடுத்துக்கொண்ட தொகையத்தின் மதிப்பிற்கும் சிறிது வித்தியாசமே உள்ளது. ஆனால், மெய்யான ஆற்றலை பெரும வரம்பாக இட்டுத்தொகையத்தைத் தீர்ப்பது என்பது கடினமான செயலாகும். அறை வெப்பநிலையில் ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டம் கடத்துப் பட்டையின் அடிமட்டத்திலிருந்து '$4kT$' ஆற்றல் தொலைவுக்கும் கீழே உள்ளதாகக் கொள்வோம். அஃதாவது,

$$E_c - E_f >> 4kT \approx 0.1 \text{ எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு.}$$

அதனால் முழுத்தொகையத்தின் வரம்புகளுக்குள், அறை வெப்பநிலையில்

$$E - E_f >> 4kT;\ \text{மேலும்}\ \exp\left(\frac{E-E_f}{kT}\right) >> 1$$

$$\text{அதனால்,}\quad \frac{1}{\exp\left(\frac{E-E_f}{kT}\right)+1} \approx \exp\left(-\left(\frac{E-E_f}{kT}\right)\right) = \exp\left(\frac{E_f-E}{kT}\right)$$

$$\therefore n = \frac{4\pi}{h^3}(2m_e^*)^{3/2}\int_{E_c}^{\infty}(E-E_c)^{1/2}\exp\left(\frac{E_f-E}{kT}\right)dE \qquad (9.8)$$

இத்தொகையத்தைத் தீர்க்க, $E = E_c + x$ எனக் கொள்வோம்.

$$\therefore n = \frac{4\pi}{h^3}(2m_e^*)^{3/2}\exp\left(\frac{E_f-E_c}{kT}\right)\int_0^{\infty}x^{1/2}e^{-x/kT}dx$$

காமாச்சார்பின் (Gamma function) உதவியுடன் கீழ்க்காணும் தொகையத்தின் மதிப்பினை

$$\int_0^{\infty}x^{1/2}\,e^{-x/kT}\,dx = (kT)^{3/2}\frac{\pi^{1/2}}{2} \qquad (9.9)$$

என எளிதாய்க் காணலாம். இதனை மேலேயுள்ள சமன்பாட்டில் இட, நமக்கு 'n' இன் மதிப்புக் கிடைக்கும்.

$$\boxed{\therefore n = 2\left[\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2}\right]^{3/2}\exp\left(\frac{E_f-E_c}{kT}\right)} \qquad (9.10)$$

ஓர்இயல்பான குறைகடத்தியில் கடத்துப்பட்டையிலுள்ள எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை இணைதிறப்பட்டையிலுள்ள துளைகளின் எண்ணிக்கைக்குச் சமமாகும். அதனால், இணைதிறப் பட்டையில் 'E' என்ற ஆற்றலின் நிலை நிரப்பப்படாமல் இருப்பதற்குரிய நிகழ்தகவு,

$$1 - p(E) = 1 - \left[\exp\left(\frac{E-E_f}{kT}\right)+1\right]^{-1}$$

$$= \exp\left(\frac{E-E_f}{kT}\right)\left[1+\exp\left(\frac{E-E_f}{kT}\right)\right]^{-1} \qquad (9.11)$$

அறைவெப்பநிலையில் ஃபெர்மி ஆற்றல்மட்டம் 'E_f', இணைதிறப்பட்டையின் மேல்மட்டமான E_v யிலிருந்து 4kT ஆற்றல் தொலைவுக்கும் மேலே உள்ளதாகக் கொள்வோம். அஃதாவது $E_f - E_v >> kT$. அதனால், பொதுவாய் அறைவெப்பநிலையில்

$$E_f - E >> 4kT\,;\ \exp\left[\frac{E-E_f}{kT}\right] << 1$$

$$\text{அதனால், } 1 - p(E) \approx \exp\left[\frac{E - E_f}{kT}\right]$$

இணைதிறப்பட்டையில் E என்ற ஆற்றலுக்கும், $E + dE$ என்ற ஆற்றலுக்கும் இடையே உள்ள காலியிடங்கள் அல்லது துளைகளின் செறிவு

$$dp = g(E)\,(1 - p(E))\,dE \tag{9.12}$$

துளையின் செயலறு நிறையாக m_h^* என எடுத்துக்கொண்டால்,

$$dp = \frac{4\pi}{h^3}\,(2\,m_h^*)^{3/2}\,(E_v - E)^{1/2}\exp\left[\frac{E - E_f}{kT}\right]dE \tag{9.13}$$

பெரும காலியிட நிலையின் ஆற்றல், இணைதிறப்பட்டையின் மேல்மட்டமான E_v ஆகும். முன்புபோல் தொகையத்தை எளிதாய்த் தீர்ப்பதற்குக் காலியிட நிலையின் சிறும ஆற்றலாக $-\infty$ யை எடுத்துக்கொள்வோம். சமன்பாடு (9.13) இல் பெரும, சிறும வரம்புகளையிட்டு தொகையப்படுத்த நமக்குக் கிடைப்பது,

$$p = \int_{-\infty}^{E_v} 4\,\pi\,\frac{(2\,m_h^*)^{3/2}}{h^3}\,(E_v - E)^{1/2}\exp\left[\frac{E - E_f}{kT}\right]dE \tag{9.14}$$

சமன்பாடு (9.8)ஐத் தீர்த்தபடி இதிலும் $E = E_v - x$ எனஇட்டு காமாச்சார்பு உதவியுடன் சமன்பாடு (9.14)ஐத் தீர்க்க,

$$\boxed{p = 2\left[\frac{2\pi m_h^*\,kT}{h^2}\right]^{3/2}\exp\left[\frac{E_v - E_f}{kT}\right]} \tag{9.15}$$

இச்சமன்பாடு இணைதிறப்பட்டையிலுள்ள காலியிடங்கள் அல்லது துளைகளின் செறிவைத்தருகிறது. இயல்பான குறைகடத்திகளில், $n = p$. அஃதாவது, மொத்த எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை, துளைகளின் எண்ணிக்கைக்குச் சமமாகும்.

$$\therefore 2\left[\frac{2\,\pi\,m_e^*\,kT}{h^2}\right]^{3/2}\exp\left[\frac{E_f - E_c}{kT}\right] = 2\left[\frac{2\,\pi\,m_h^*\,kT}{h^2}\right]^{3/2}\exp\left[\frac{E_v - E_f}{kT}\right] \tag{9.16}$$

$$\text{(அல்லது) }\left[\frac{m_h^*}{m_e^*}\right]^{3/2} = \exp\left[\frac{E_f - E_c - E_v + E_f}{kT}\right] = \exp\left[\frac{2E_f - E_v - E_c}{kT}\right]$$

இருபக்கமும் மடக்கைகளை (logarithms) எடுக்க

$$\frac{3}{2}\log\left[\frac{m_h^*}{m_e^*}\right] = \frac{2\,E_f - E_v - E_c}{kT}$$

$$\therefore E_f = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{3}{4} kT \log\left[\frac{m_h^*}{m_e^*}\right] \quad (9.17)$$

குறிப்பாய் $T = 0\ K$ (அல்லது) $m_h^* = m_e^*$ என இருக்கும்பொழுது, $E_f = \frac{E_c + E_v}{2}$. ஆனால், பொதுவாய் $m_h^* > m_e^*$. சமன்பாடு (9.17) மூலம் ஃபெர்மி ஆற்றல்மட்டம் வெப்பநிலையைச் சார்ந்துள்ளது. அஃதாவது, வெப்பநிலை கூடும்பொழுது அதன் மட்டமும் சிறிது உயர்கிறது. குறிப்பாய், மட்ட உயர்த்தி கணக்கில் எடுத்துக்கொள்ளுமளவு இராது. அதனால் எளிய நேர்வுகளுக்கு (simple cases) இயல்பான குறைகடத்தியில்

$$E_f = \frac{E_c + E_v}{2} \quad (9.17(அ))$$

என எடுத்துக்கொள்ளப்படுகிறது. அஃதாவது, அறைவெப்பநிலையில் கடத்துப் பட்டைக்கும், இணைதிறபட்டைக்கும் நடுவில் சரியாய் ஃபெர்மி ஆற்றல்மட்டம் இருப்பதாய்க் கொள்கிறோம்.

இயல்பான குறைகடத்தியில், $n = p$. எனவே $n = p = n_i$ என எடுத்துக்கொள்வோம். இதில் n_i என்பது இயல்பான அல்லது மாசற்ற குறைகடத்தியில் மின்னூட்டக்கடத்திகளின் செறிவு ஆகும்.

$$n_i^2 = np = 4\left(\frac{2\pi kT}{h^2}\right)^3 (m_e^* m_h^*)^{3/2} e^{-E_g/kT} \quad (9.18)$$

(அல்லது)
$$n_i = 2\left(\frac{2\pi kT}{h^2}\right)^{3/2} (m_e^* m_h^*)^{3/4} e^{-E_g/2kT} \quad (9.19)$$

இங்கு E_g என்பது விலக்கப்பட்ட ஆற்றல் இடைவெளி ஆகும். அதனை எளிதாய்ப் பட்டை இடைவெளி (band gap) அல்லது ஆற்றல் இடைவெளி (energy gap) என்றும் கூறுவர். அஃதாவது, கடத்துப்பட்டைக்கும் இணைதிறப்பட்டைக்கும் இடையே உள்ள இடைவெளி ஆகும். அதனால் $E_g = E_c - E_v$.

மேலும், இயல்பான குறைகடத்தியில் மின்கடத்துந்திறன்,

$$\sigma_i = (ne\,\mu_e + pe\,\mu_h) \quad (9.20)$$

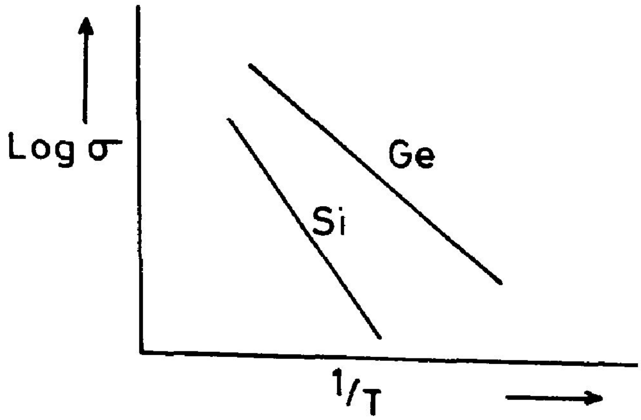
இதில் μ_e யும் μ_h ம் முறையே எலெக்ட்ரான், துளையின் நகர்வுதிறன் ஆகும். நகர்வு திறன் என்பது ஓரலகு மின்புலத்தினால் அல்லது மின்னழுத்தச் சரிவினால் எலெக்ட்ரான் அல்லது துளைக்குக் கிடைக்கும் கூடுதல் திசைவேகமாகும். இயல்பான குறைகடத்தியில் நகர்வுதிறன், எலெக்ட்ரானானது போனான்கள் அல்லது அணிக்கோவை அதிர்வுகளுடன் கொள்ளும் இடைவினை மூலம் வரையறுக்கப்படுகிறது. இத்தகைய நேர்வில் μ_e, μ_h ஆகியவை $T^{-3/2}$ க்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளன. ஓர் இயல்பான குறைகடத்தியின்,

மின்கடத்துந்திறனைப் பின்வருமாறும் எழுதலாம் :

$$\sigma_i = n_i\, e(\mu_e + \mu_h) = (\mu_e + \mu_h)\, 2e \left(\frac{2\pi\, kT}{h^2} \right)^{3/2} (m_e^* \, m_h^*)^{3/4}\, e^{-E_g/2kT}$$

(அல்லது) $$\sigma_i = C\, e^{-E_g/2kT} \tag{9.21}$$

இங்கு C என்பது ஒரு மாறிலி.



படம் 9.7 இயல்பான குறைகடத்தியில் மின்கடத்துந்திறனுக்கும் வெப்பநிலைக்கும் உள்ள தொடர்பினைக் காட்டும் வரை

படம் 9.7 இல் காட்டியவாறு இயல்பான குறைகடத்தியில் வெப்பநிலை கூடும்பொழுது அதன் மின்கடத்துந்திறனும் கூடுகிறது.

சமன்பாடு (9.21) ஐ பின்வருமாறு எழுதலாம். $\log \sigma_i = \log C - \frac{E_g}{2kT}$

இஃது ஒரு நேர்கோட்டுக்குரிய சமன்பாடாகும். இதன் சாய்வு $-E_g/2k$ ஆகும்.

9.7 இயல்பான குறைகடத்தியின் பட்டை இடைவெளியைக் கண்டுபிடித்தல்

ஓர்இயல்பான குறைகடத்தியின் மின்கடத்துந்திறன்,

$$\sigma_i = C\, e^{-E_g/2kT}$$

எனக் கண்டோம். அதனால், மின் எதிர்ப்புத்திறன்,

$$\rho_i = \frac{1}{\sigma_i} = \frac{1}{C}\, e^{E_g/2kT} = \frac{R_i A}{L}$$

இங்கு $R_i =$ இயல்பான குறைகடத்தியின் மின்தடை ; 'A' என்பது அதன் குறுக்குவெட்டுப்பரப்பு ; 'L' என்பது அதன் மொத்தநீளம் ஆகும்.

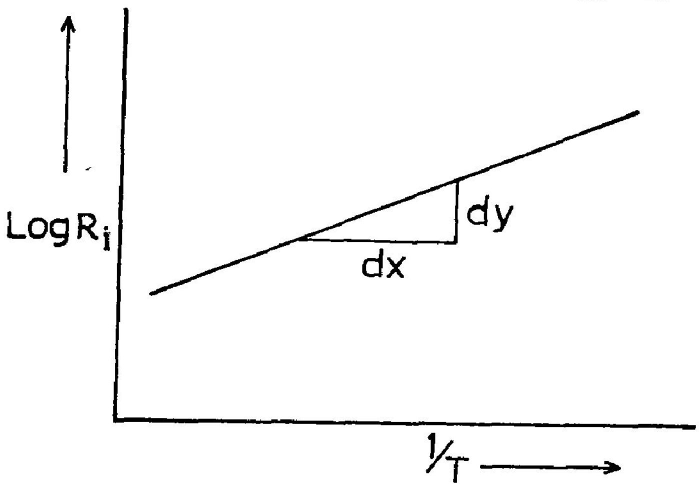
$$\therefore R_i = \frac{L}{CA} e^{E_g/2kT}$$

(அல்லது) $$R_i = C' e^{E_g/2kT} \qquad (9.22)$$

இதில் C' என்பது $\frac{L}{CA}$ க்குச் சமம். மேலும், அஃது ஒருமாறிலி; ஏனெனில் L, C, A ஆகியவை மாறிலிகளாகும். மடக்கையை இருபக்கமும் எடுக்க

$$\log R_i = \log C' + E_g/2kT \qquad (9.23)$$

மேற்கண்ட சமன்பாடு இயல்பான குறைகடத்தியின் பட்டை இடைவெளியைக் கண்டுபிடிக்க ஒருவழியைக் காட்டுகிறது. இயல்பான குறைகடத்தியின் மின்தடையை வெவ்வேறு வெப்பநிலைகளில் அஞ்சலகப்பெட்டி (post office box) அல்லது கேரி பாஸ்டர் சமனச் சுற்று (Carey Foster's bridge) மூலம் கண்டுபிடிக்கலாம். பிறகு $\log R_i$ ஐ y அச்சிலும், அதனுடைய கெல்வின் வெப்பநிலையின் தலைகீழியை x அச்சிலும் எடுத்து ஒரு வரைபடம் வரையவேண்டும். வரைபடத்தின் சாய்வு $\frac{dy}{dx} = \frac{E_g}{2k}$ ஆகும்.



படம் 9.8 இயல்பான குறைகடத்தியில் வெப்பநிலை மாறுபட்டால் மின்தடை மாறும் விதம்

அதனால், $E_g = 2\,k\,(dy/dx)$.. இதிலுள்ள dy/dx ஐ வரைபடம் (படம் 9.8) மூலம் கண்டுபிடிக்கலாம்; போல்ட்ஸ்மேன் மாறிலியின் மதிப்பு அனைவருக்கும் தெரிந்ததே (1.38×10^{-23} ஜூல்/கெல்வின்).

பொதுவாகப் பட்டை இடைவெளியை எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டில் குறிப்பிடுவர். 1 ஜூல் $= 6.242 \times 10^{18}$ எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு ஆகும்.

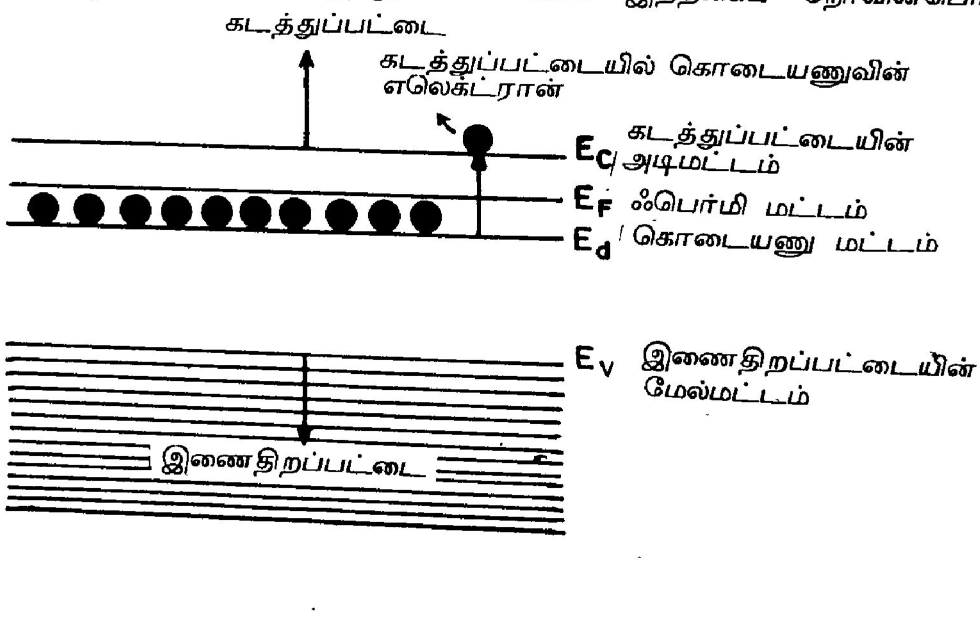
9.8 நிறைசெயல் விதி (Law of mass action)

ஒரு குறைகடத்தியில் ஒருகுறிப்பிட்ட வெப்பநிலையில் எலெக்ட்ரான் செறிவு, துளைச்செறிவு ஆகியவற்றின் பெருக்கற்பலன் ஒருமாறிலியாகும். அதில் எலெக்ட்ரான் எண்ணிக்கையைக் கூட்ட கொடை அணுக்களைக் கலந்தால் துளைகளின் எண்ணிக்கையும் அதற்கு ஏற்றாற்போல் குறையும்; அதனால், பெருக்கற்பலன் 'np' மாறாமல் இருக்கும். இதனையே **நிறைசெயல் விதி** என்று குறைகடத்தித்தொழில் நுட்பத்தில் கூறுகிறார்கள். பெருக்கற் பலனாகிய 'np' எந்த ஒருகுறைகடத்தியை எடுத்தாலும் (அஃதாவது,இயல்பான குறைகடத்தி அல்லது கலப்புற் குறைகடத்தி) அது குறிப்பிட்ட வெப்பநிலையில் மாறாமல் இருக்கும்.

9.9. N வகை குறைகடத்திகளில் மின்னூட்டக் கடத்திகளின் செறிவும், வெப்பநிலை, கொடை அணுக்கள் செறிவு ஆகியவற்றின் மாற்றங்களால் ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டத்தில் உண்டாகும் மாற்றமும்

கடத்துப் பட்டைக்குக் கீழே ஓரலகு பருமனில் N_d கொடையணு ஆற்றல் மட்டங்கள் E_d என்ற ஆற்றலை உடையதாய்க் கொள்வோம். மிகக் குறைந்த வெப்ப நிலையில் மிகக்குறைவான கொடையணுக்களே அயனிகளாய் மாறும். அதனால், நடைமுறையில் அனைத்துக் கொடையணு ஆற்றல் மட்டங்களும் எலெக்ட்ரான்களால் நிரப்பப்பட்டு இருக்கும்.

நாம் $(E_c - E_f) > 4kT$ என எடுத்துக்கொள்வோம். இத்தகைய நேர்வின்பொழுது



படம் 9.9 N வகைக் குறைகடத்தியின் பல்வேறு ஆற்றல் மட்டங்கள்

கடத்துப்பட்டையிலுள்ள எலெக்ட்ரான்களின் அடர்த்தி

$$n = 2\left[\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2}\right]^{3/2} \exp\left[\frac{E_f - E_c}{kT}\right] \tag{9.10}$$

மேலும், ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டம் E_f, கொடையணு ஆற்றல் மட்டத்துக்கு மேலே, ஒருசில kT ஆற்றலுக்கு மேலாகவே உள்ள மட்டத்தில் இருப்பதாய்க் கொள்வோம். அதனால், காலியான கொடையணு ஆற்றல் மட்டங்களின் அடர்த்தியைப் பின்வருமாறு எழுதலாம் :

$$N_d\,(1 - p\,(E_d)) \approx N_d \exp\left[\frac{E_d - E_f}{kT}\right] \tag{9.24}$$

இதில் $(1 - p\,(E_d))$ என்பது கொடையணு ஆற்றல் மட்டங்கள் காலியாய் இருப்பதற்குரிய நிகழ்தகவைக் குறிக்கிறது. நடைமுறையில் மிகக் குறைந்த வெப்பநிலைகளில் இணைதிறப் பட்டையிலுள்ள எலெக்ட்ரான்கள் கடத்துப் பட்டைக்கு வெப்பக் கிளர்ச்சியின்மூலம் செல்லத் தேவையான ஆற்றல் கிடைக்காது. அதனால், காலியான கொடையணு ஆற்றல் மட்டங்களின் அடர்த்தியும் கடத்துப் பட்டையிலுள்ள எலெக்ட்ரான்களின் அடர்த்தியும் சமமாயிருக்கும். ஆகையால்,

$$2\left[\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2}\right]^{3/2} \exp\left[\frac{E_f - E_c}{kT}\right] = N_d \exp\left[\frac{E_d - E_f}{kT}\right] \tag{9.25}$$

மடக்கைகளை இருபக்கமும் எடுத்து, மாற்றியமைத்தால் நமக்குக் கிடைப்பது

$$\left[\frac{E_f - E_c}{kT}\right] - \left[\frac{E_d - E_f}{kT}\right] = \log N_d - \log 2\left[\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2}\right]^{3/2}$$

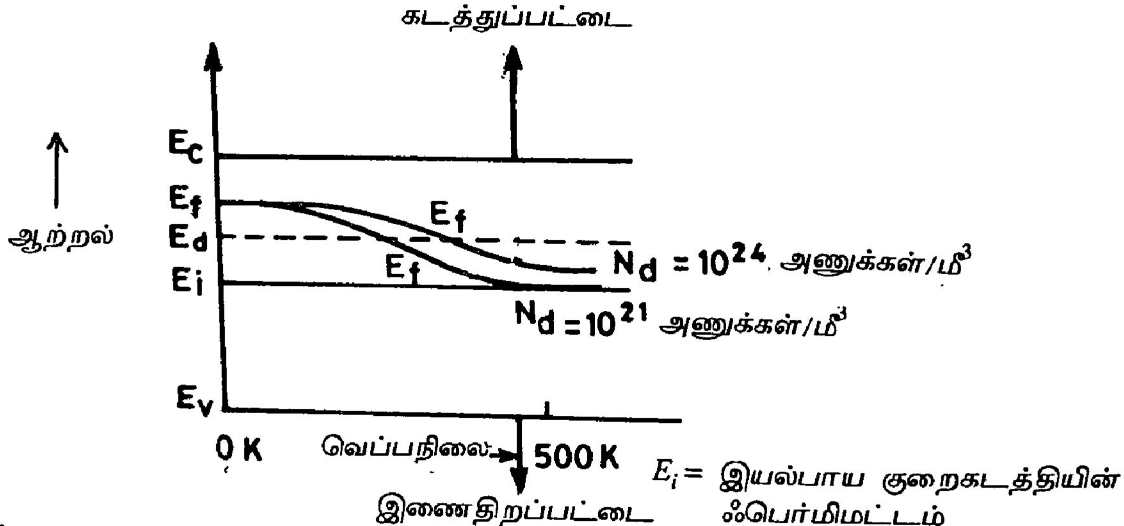
சுருக்கியபின் நமக்குக் கிடைப்பது,

$$E_f = \frac{E_d + E_c}{2} + \frac{kT}{2}\log\left[\frac{N_d}{2\left(\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2}\right)^{3/2}}\right] \tag{9.26}$$

எனவே சுழிகெல்வின் வெப்பநிலையில், $E_f = \left[\frac{E_d + E_c}{2}\right]$

இதனால் ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டம், சுழி கெல்வின் வெப்பநிலையில் கடத்துப் பட்டையின் அடிமட்டத்திற்கும், கொடையணு ஆற்றல் மட்டத்திற்கும் சரியாய் நடுவில் அமைந்துள்ளது என்பதனைத் தெரிந்துகொள்ளலாம். ஆனால், வெப்பநிலை கூடவும் ஃபெர்மி மட்டம் கீழ்நோக்கி இறங்குகிறது. மேலும், மிகக் குறைந்த வெப்ப

நிலையிலிருந்து வெப்பநிலை சிறிது சிறிதாகக்கூட, கடத்துப் பட்டைக்கு இணைதிறப் பட்டையிலிருந்துவரும் எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கையும் கூடிக்கொண்டே போகும். மிகஉயர்ந்த வெப்பநிலைகளில் (ஜெர்மேனியத்தில் 500 கெல்வின்) இணைதிறப் பட்டையிலிருந்துவரும் எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை கொடையணுக்களின் செறிவைவிட மிகுதியாயிருக்கும். அதனால் 'N' வகை குறைகடத்தி உயர்வெப்பநிலைகளில் தூய குறைகடத்திபோல் செயல்படும்.



படம் 9.10 வெப்பநிலை, கொடையணுச்செறிவு மாற்றங்களால் ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டத்தின் மாற்றம்.

படம் 9.10 இல் ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டம் வெப்பநிலை, கொடையணுச்செறிவு ஆகியவற்றின் மாற்றங்களால் எங்ஙனம் மாறுகிறது என்பது காட்டப்பட்டுள்ளது. இதில் E_i என்பது விலக்கப்பட்ட ஆற்றல்பட்டையின் மையமாகும் (அல்லது) தூய குறைகடத்தியில் ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டம் உள்ள இடமாகும். E_f இன் மதிப்பினைச் சமன்பாடு (9.26) ல் இருந்து $\exp\left[\frac{E_f - E_c}{kT}\right]$ இல் இட நமக்குக் கிடைப்பது,

$$\exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right) = \exp\left[\left(\frac{E_d - E_c}{2kT}\right) + \frac{1}{2}\log\frac{N_d}{2\left(\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2}\right)^{3/2}}\right] = \exp\left(\frac{E_d - E_c}{2kT}\right)\frac{N_d^{1/2}}{\left\{2\left(\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2}\right)^{3/2}\right\}^{\frac{1}{2}}}$$

இதைச் சமன்பாடு (9.10) இல் இட

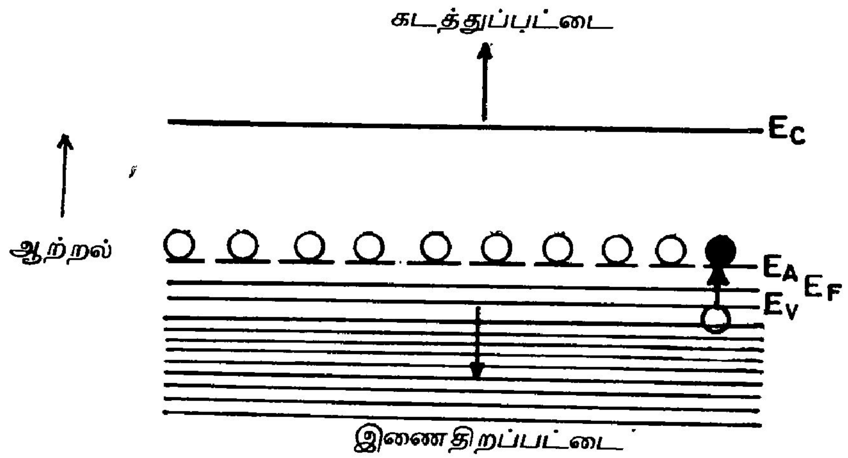
$$n = 2\left(\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2}\right)^{3/2}\frac{N_d^{1/2}}{\left(2\left[\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2}\right]^{3/2}\right)^{1/2}}\exp\left(\frac{E_d - E_c}{2kT}\right)$$

$$n = (2N_d)^{1/2} \left(\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right)^{3/4} \exp\left(\frac{E_d - E_c}{2kT} \right) \qquad (9.27)$$

சமன்பாடு (9.27) மூலம் கடத்துப்பட்டையிலுள்ள எலெக்ட்ரான்களின் அடர்த்தி மிகக் குறைந்த வெப்பநிலைகளில் கொடையணுக்களின் செறிவின் வர்க்கமூலத்திற்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது என்பது தெரிய வருகிறது. ஆனால், மிக உயர்ந்த வெப்பநிலைகளில் இயல்பான மின்னூட்டக் கடத்திகளின் செறிவு கொடையணுக்கள் மூலம் வரும் எலெக்ட்ரான் செறிவினைவிட அதிகமாகி 'N' வகை குறைகடத்தியின் செயல்திறனைத் தூயகுறைகடத்திபோல் செய்துவிடுகிறது.

9.10 'P' வகை குறைகடத்திகளில் மின்னூட்டக் கடத்திகளின் செறிவும், வெப்பநிலை, ஏற்பு அணுக்கள் செறிவு ஆகியவற்றின் மாற்றங்களால் ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டத்தில் உண்டாகும் மாற்றமும்.

படம் 9.11இல் காட்டியவாறு இணைதிறப்பட்டைக்குமேல் ஓரலகு பருமனில் N_a ஏற்பு அணு ஆற்றல் மட்டங்கள் E_A என்னும் ஆற்றலை உடையதாய்க் கொள்வோம். 'N' வகைக்குறைகடத்தியின் கடத்துப் பட்டையில் உள்ள எலெக்ட்ரான் செறிவினைக் கண்டுபிடித்ததுபோல் 'P' வகைக் குறைகடத்தியிலும் இணைதிறப்பட்டையில் உள்ள துளைகளின் செறிவினைப் பின்வருமாறுக் கண்டுபிடிக்கலாம்.



O→ஏற்பு அணுக்களின் ஆற்றல் மட்டங்களில் உள்ள காலியிடங்கள்.

●→இணைதிறப்பட்டையிலிருந்து சென்று ஏற்பு அணு ஆற்றல் மட்டத்தில் உள்ள காலியிடத்தில் அமர்ந்த ஓர் எலெக்ட்ரான். அதனால் இணைதிறப்பட்டையில் ஒரு துளை உருவானதை நோக்கவும்.

படம் 9.11 'P' வகைக் குறைகடத்தியின் பல்வேறு ஆற்றல் மட்டங்கள்

மிகக்குறைந்த வெப்பநிலைகளில் மிகக்குறைவான ஏற்பு அணுக்களே எதிர்க்குறி அயனிகளாய் ஆக்கப்படுகின்றன. அதனால் நடைமுறையில் அனைத்து ஏற்பு அணுக்கள் ஆற்றல்மட்டங்களும் கட்டுண்ட காலியிடங்கள் அல்லது துளைகளாயிருக்கும்; நாம் $(E_f - E_v) > 4\,kT$ என எடுத்துக்கொள்வோம். இத்தகைய நேர்வின் பொழுது இணைதிறப் பட்டையிலுள்ள துளைகளின் அடர்த்தி,

$$\boxed{p = 2\left(\frac{2\pi m_h^* kT}{h^2}\right)^{3/2} \exp\left(\frac{E_v - E_f}{kT}\right)} \tag{9.28}$$

மேலும், ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டம் E_f ஏற்பு அணு ஆற்றல் மட்டத்துக்குக் கீழே ஒருசில kT ஆற்றலுக்குக் கீழேயே உள்ள மட்டத்தில் இருப்பதாய்க் கொள்வோம். அதனால், நிரப்பப்பட்ட ஏற்புஅணு ஆற்றல் மட்டங்களின் அடர்த்தியைப் பின்வருமாறு எழுதலாம்.

$$N_a\,(\,1 - p(E_A)\,) \approx N_a \exp\left[\frac{E_f - E_A}{kT}\right] \tag{9.29}$$

இதில் $(\,1 - p\,(E_A)\,)$ என்பது ஏற்புஅணு ஆற்றல் மட்டங்கள் நிரம்பி இருப்பதற்குரிய நிகழ்தகவினைக் குறிக்கிறது. நடைமுறையில் மிகக்குறைந்த வெப்ப நிலைகளில் இணைதிறப் பட்டையிலுள்ள எலெக்ட்ரான்கள் கடத்துப்பட்டைக்கு வெப்பக் கிளர்ச்சியின்மூலம் செல்லத் தேவையான ஆற்றல் கிடைக்காது. அதனால், நிரப்பப்பட்ட ஏற்புஅணு ஆற்றல் மட்டங்களின் அடர்த்தியும், இணை திறப்பட்டையிலுள்ள காலியிடங்களின் அடர்த்தியும் சமமாயிருக்கும். அதனால்,

$$2\left(\frac{2\pi m_h^* kT}{h^2}\right)^{3/2} \exp\left(\frac{E_v - E_f}{kT}\right) = N_a \exp\left(\frac{E_f - E_A}{kT}\right) \tag{9.30}$$

மடக்கைகளை இருபக்கமும் எடுத்து மாற்றியமைக்க,

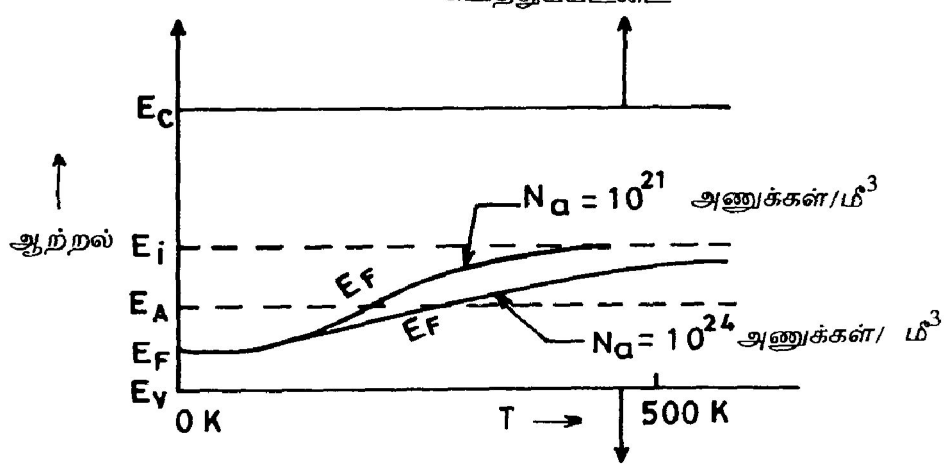
$$\left(\frac{E_v - E_f}{kT}\right) - \left(\frac{E_f - E_A}{kT}\right) = \log\left[\frac{N_a}{2\left(\frac{2\pi m_h^* kT}{h^2}\right)^{3/2}}\right]$$

சுருக்கியபின் நமக்குக் கிடைப்பது

$$E_f = \frac{E_v + E_A}{2} - \frac{kT}{2}\log\left[\frac{N_a}{2\left(\frac{2\pi m_h^* kT}{h^2}\right)^{3/2}}\right] \tag{9.31}$$

அதனால், சுழிகெல்வின் வெப்பநிலையில், ஏற்புஅணு ஆற்றல் மட்டத்திற்கும் இணைதிறப்பட்டையின் மேல்மட்டத்திற்கும் நடுவில் சரியாய் ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டம்

அமைந்துள்ளது. ஆனால், வெப்பநிலை கூடவும், ஃபெர்மி மட்டம் மேல் நோக்கி உயர்கிறது. மேலும், மிகக்குறைந்த வெப்பநிலையிலிருந்து வெப்பநிலை சிறிது சிறிதாகக்கூடக் கடத்துப்பட்டைக்கு இணைதிறப்பட்டையிலிருந்து வரும் எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கையும் கூடிக்கொண்டே போகும்; அதனால், இணைதிறப்பட்டையில் காலியிடங்கள் அல்லது துளைகளின் எண்ணிக்கையும் கூடிக்கொண்டே போகும். மிகஉயர்ந்த வெப்பநிலைகளில் (ஜெர்மேனியத்தில் 500 கெல்வின்) இணைதிறப்பட்டையில் ஏற்படும் காலியிடங்களின் எண்ணிக்கை ஏற்பு அணுக்களின் செறிவினைவிட அதிகமாயிருக்கும். அதனால், '*P*' வகைக் குறைகடத்தி உயர்வெப்பநிலைகளில் இயல்பாய குறைகடத்திபோல் செயல்படும்.



E_i – இயல்பாய குறைகடத்தியின் ஃபெர்மிமட்டம்.

படம் 9.12 வெப்பநிலை, ஏற்புஅணுச்செறிவு ஆகியவற்றின் மாற்றங்களால் ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டத்தின் மாற்றம்.

படம் 9.12ல் ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டம் வெப்பநிலை, ஏற்புஅணுச்செறிவு மாற்றங்களால் எவ்வாறு மாறுகிறது என்பது காட்டப்பட்டுள்ளது. இதில் E_i என்பது விலக்கப்பட்ட ஆற்றல்பட்டையின் மையமாகும் (அல்லது) இயல்பாய குறைகடத்தியில் ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டமுள்ள இடமாகும். E_f இன் மதிப்பைச் சமன்பாடு (9.31) இல் இருந்து எடுத்து $\exp\left(\frac{E_v - E_f}{kT}\right)$ இல் இட நமக்குக் கிடைப்பது,

$$\exp\left[\frac{E_v - E_f}{kT}\right] = \exp\left[\left(\frac{E_v - E_A}{2kT}\right) + \frac{\log}{2}\left\{\frac{N_a}{2\left(\frac{2\pi m_h^* kT}{h^2}\right)^{3/2}}\right\}\right]$$

$$= \exp\left[\frac{E_v - E_A}{2kT}\right] \frac{N_a^{1/2}}{\left\{2\left[\frac{2\pi m_h^* kT}{h^2}\right]^{3/2}\right\}^{1/2}}$$

இதனைச் சமன்பாடு (9.28)ல் இட,

$$p = (2N_a)^{1/2} \left(\frac{2\pi m_h^* kT}{h^2}\right)^{3/4} \exp\left[\frac{E_v - E_A}{2kT}\right] \quad (9.32)$$

அதனால், இணைதிறப்பட்டையிலுள்ள துளைகளின் அடர்த்தி மிகக்குறைந்த வெப்ப நிலைகளில் ஏற்புஅணுக்களின் எண்ணிக்கையின் வர்க்கமூலத்திற்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது. ஆனால், மிகஉயர்ந்த வெப்பநிலைகளில் இயல்பான மின்னூட்டக் கடத்திகளின் செறிவு ஏற்பு அணுக்களின் மூலம் வரும் துளைகளின் செறிவினைவிட அதிகமாகி, 'P' வகைக்குறைகடத்தியின் செயல்திறனை இயல்பாய குறைகடத்திபோல் செய்துவிடுகிறது. அதனால், 'P' வகை, 'N' வகை குறைகடத்திகள் உயர்வெப்ப நிலைகளில் ஏறத்தாழ இயல்பாய குறைகடத்தியின் குணங்களைக்கொண்டு இயல்பாய குறைகடத்தி போலாகிவிடும். அதனால்தான் குறைகடத்திக்கருவிகளை இயக்கும்பொழுது, அவற்றின் இயக்க வெப்பநிலைக்கு (operating temperature) ஒரு வரம்பு வரையறுக்கப்படுகிறது.

9.11 மின்னூட்டங்களின் நடுநிலைமை (charge neutrality)

ஒரு குறைகடத்திப்படிகத்தில் ஏற்புஅணுக்களையோ, கொடையணுக்களையோ இரண்டையுமோ கலக்கும்போது மின்னூட்டங்களின் நடுநிலைமை, எந்த வேற்று அணுக்களையும் சார்ந்திராமல் நிலைநிறுத்தப்படுகிறது. ஒருபடிகத்தில் ஏற்பு அணுக்களும், கொடையணுக்களும் கலந்துள்ளனவாய்க் கொள்வோம். மின்னூட்டங்களின் நடுநிலைமையால் படிகத்தில் நேர்க்குறியுடைய மின்னூட்டத் துகள்களின் மொத்த மதிப்பு, எதிர்க்குறியுடைய மின்னூட்டத்துகள்களின் மொத்த மதிப்பிற்குச் சமம். அஃதாவது,

$$(N_d - n_d) + p = (N_a - n_a) + n \quad (9.33)$$

(நேர்க்குறி மின்னூட்டங்கள்) = (எதிர்க்குறி மின்னூட்டங்கள்)

இதில் N_d = கொடையணுக்களின் செறிவு;

N_a = ஏற்புஅணுக்களின் செறிவு;

n = கடத்துப் பட்டையிலுள்ள எலெக்ட்ரான்களின் செறிவு

p = இணைதிறப் பட்டையிலுள்ள துளைகளின் செறிவு

n_d = அயனியாக்கப்படாத கொடையணுக்களின் செறிவு

n_a = அயனியாக்கப்படாத ஏற்பு அணுக்களின் செறிவு

அனைத்து வேற்றுப்பொருள் அணுக்களும் அயனிகளாய் ஆக்கப்பட்டதாய்க் கொள்வோம்.

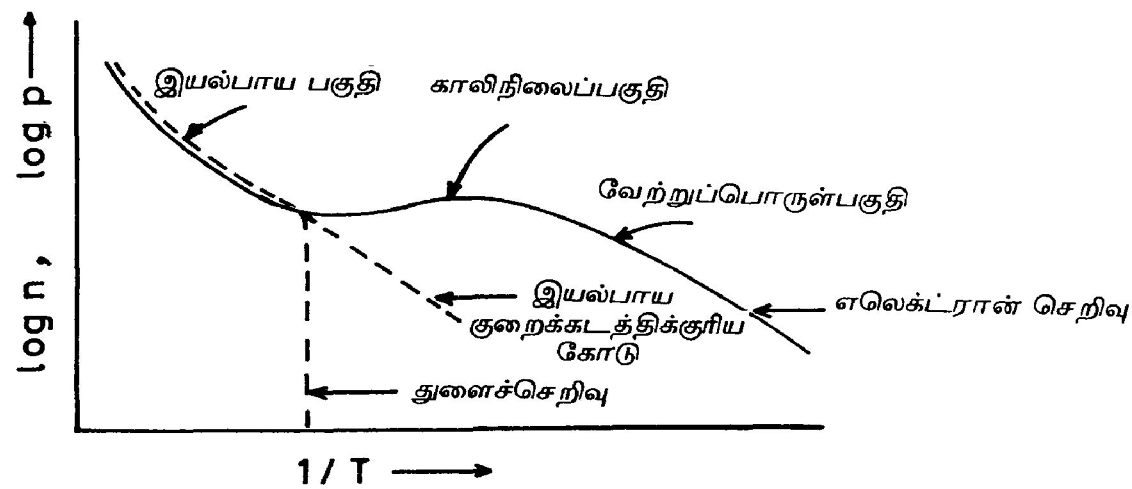
அதனால், $n_d = n_a = 0. \therefore N_d + p = N_a + n$ இச்சமன்பாட்டிலிருந்து பின்வரும் முடிவுகளைத் தெரிந்து கொள்ளலாம்:

(அ) ஓர் இயல்பாய குறைகடத்தியில் $N_d = N_a = 0. \therefore p = n$ அஃதாவது, மொத்தத் துளைகளின் மதிப்பு மொத்த எலெக்ட்ரான்களின் மதிப்பிற்குச் சமம்.

(ஆ) ஒரு 'N' வகைக் குறைகடத்தியில் $N_a = 0; \therefore N_d + p = n.$ அஃதாவது, ஒற்றை நேர்மின்னேற்றம் பெற்ற அயனிகளாயுள்ள கொடையணுக்களின் செறிவும், மொத்தத் துளைகளின் செறிவும் சேர்ந்த கூட்டுத்தொகையின் மதிப்பு, அதிலுள்ள எலெக்ட்ரான்களின் செறிவிற்குச் சமம்.

(இ) ஒரு 'P' வகைக் குறைகடத்தியில் $N_d = 0; \therefore N_a + n = p.$ அஃதாவது, ஒற்றை எதிர்மின்னேற்றம்பெற்ற அயனிகளாயுள்ள ஏற்புஅணுக்களின் செறிவும் மொத்த எலெக்ட்ரான்களின் செறிவும் சேர்ந்த கூட்டுத்தொகை அதிலுள்ள மொத்தத் துளைகளின் செறிவிற்குச் சமம்.

9.12 'N' வகைக் குறைகடத்தியில் வெப்பநிலை மாறுபாட்டால் மின்னூட்டக் கடத்திகளின் செறிவில் ஏற்படும் மாற்றம்



படம் 9.13 'N' வகைக் குறைகடத்தியில் வெப்பநிலை மாறுபாட்டால் மின்னூட்டக் கடத்திகளின் செறிவில் ஏற்படும் மாற்றம்

படம் 9.13 இல் '*N*' வகைக் குறைகடத்தியில் மின்னூட்டக் கடத்திகளின் செறிவு வெப்பநிலை மாறுபாட்டால் எவ்வாறு மாறுகிறது என்பது வரைபடம்மூலம் காட்டப்பட்டுள்ளது. இதில் மூன்றுவெவ்வேறு வெப்பநிலைப் பகுதிகள் உள்ளன. மிகக்குறைந்த வெப்பநிலைகளில் குறிப்பாய்ச் சுழிகெல்வின் வெப்பநிலைக்கு அருகில் ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டம், கொடையணு ஆற்றல் மட்டத்திற்கும், கடத்துப்பட்டையின் அடிமட்டத்திற்கும் நடுவே அமைந்துள்ளது. வெப்பநிலை உயர உயரக் கொடையணுக்கள் அயனிகளாய் ஆக்கப்படுவதால், எலெக்ட்ரான் செறிவும் கடத்துப் பட்டையில் ஒரேசீராய் உயர்ந்துகொண்டே போகிறது. வரைபடத்தில் இப்பகுதி வேற்றுப்பொருள் பகுதி எனக் குறிப்பிடப்பட்டுள்ளது. இப்பகுதியில் வெப்பநிலை உயர உயர ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டம் கொடையணு ஆற்றல் மட்டத்தை நோக்கிக் கீழே இறங்குகிறது. அறைவெப்பநிலையில் எல்லாக் கொடையணுக்களும் அயனிகளாய் மாற்றப்பட்டுவிடுகின்றன. அதனால் கடத்துப்பட்டையிலுள்ள எலெக்ட்ரான்களின் செறிவு, ஒருகுறிப்பிட்ட வெப்பநிலைவரை மாறாமல் இருக்கும். வரைபடத்தில் இப்பகுதியைக் காலிநிலைப்பகுதி எனக் குறிப்பிடப்பட்டுள்ளது. இப்பகுதியில் ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டம், கொடையணு ஆற்றல் மட்டத்தைக் கடந்துவிடுகிறது.

வெப்பநிலை மேலும் உயர, இணைதிறப் பட்டையிலுள்ள அணுக்கள் வெப்பக் கிளர்ச்சியால் அயனிகளாய் மாறி, எலெக்ட்ரான்கள் கிடைப்பதுடன் அவை இணைதிறப் பட்டையிலிருந்து கடத்துப்பட்டையை நோக்கி நகர்த்தப்படுகின்றன. ஏற்பு அணுக்களிலிருந்து வரும் எலெக்ட்ரான்களைவிட இணைதிறப்பட்டையிலிருந்து மிகுதியான எலெக்ட்ரான்கள் வர இயலும். ஏனெனில், அளவில்லா எலெக்ட்ரான்களை இணைதிறப்பட்டை கொண்டுள்ளது. ஆனால், ஏற்புஅணு ஆற்றல் மட்டத்தால் ஏற்பு அணுக்களின் செறிவுஅளவுதான் எலெக்ட்ரான்களை அளிக்கமுடியும். வெப்பநிலை மிகமிக மிகுதியாய் இருக்கும்பொழுது கடத்துப் பட்டையிலுள்ள எலெக்ட்ரான்களில் இணைதிறப்பட்டையிலிருந்து வந்த எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை, ஏற்பு அணுஆற்றல் மட்டத்திலிருந்து வந்த எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கையைவிட மிக அதிகமாயிருக்கும். அதே சமயம் ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டம் விலக்கப்பட்ட ஆற்றல் பட்டையின் நடுவில் வந்துவிடும். அதனால், 'N' வகை குறைகடத்தி ஏறத்தாழ இயல்பாய குறைகடத்திபோல் செயல்படும். வரைபடத்தில் இப்பகுதி, இயல்பாய பகுதி என்று குறிக்கப்பட்டுள்ளது.

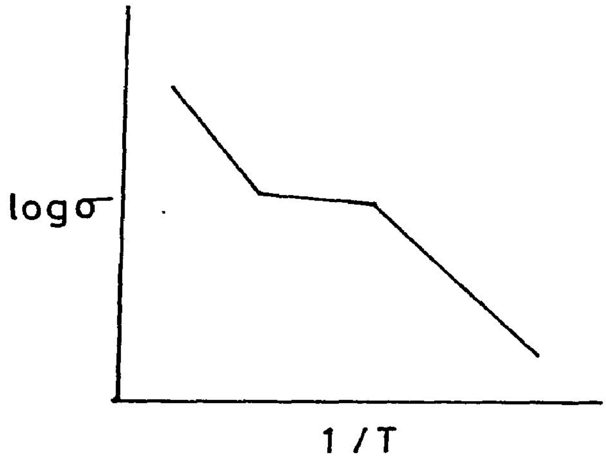
படம் 9.13இல் வெப்பநிலை உயரும்போது '*N*' வகைக் குறைகடத்தியில் உள்ள துளைகளின் செறிவு எவ்வாறு மாறுகிறது என்பதைத் தொடர்ச்சியில்லாச் சிறு கோடுகளும், புள்ளிகளும் உள்ள கோடு காட்டுகிறது. இயல்பாய பகுதியில் துளை, எலெக்ட்ரான் ஆகியவற்றின் செறிவுகளுக்குரிய வரைகோடுகள் ஒன்றனையொன்று விலகாமல் சேர்ந்திருக்கின்றன. ஏனெனில், இயல்பாய பகுதியில் மொத்தத் துளைகளின் எண்ணிக்கை, மொத்த எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கைக்குச் சமம். வரைபடத்தின் தட்டையான பகுதியை (காலிநிலை பகுதி)க் கொடையணுக்களின் செறிவு குறைவாயுள்ளபோதுதான் காணமுடியும். அஃதாவது, கொடையணுக்களின் செறிவு மிகுதியாயிருந்தால் வெப்பநிலை உயரஉயர குறைவான வெப்பநிலையில் உள்ள வேற்றுப் பொருள் பகுதி தட்டையான காலிநிலைப் பகுதிக்கு வராமலேயே நேராக இயல்பாய பகுதிக்குச் சென்று விடும். மேலும்,

குறைகடத்திக் கருவிகளை வேற்றுப்பொருள் பகுதியிலோ, காலிநிலைப் பகுதியிலோ வேலை செய்யுமாறு அமைப்பது மிக நல்லதாகும். ஏனெனில், அப்பொழுதுதான் வேற்றுப்பொருள் கலப்பதால்வரும் மொத்தப் பயனை நாம் அடையமுடியும். அதனால், ஜெர்மேனியத்தினால் செய்யப்பட்ட குறைகடத்திக் கருவிகளுக்கு ($E_g = 0.7$ எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு) அதிக பட்ச இயக்க வெப்பநிலை 100° சென்டிகிரேடு, சிலிக்கானால் செய்யப்பட்ட குறைகடத்திக் கருவிகளுக்கு ($E_g = 1.1$ எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு) அதிக பட்ச இயக்க வெப்பநிலை 200° சென்டிகிரேடு என்று வரையறுக்கப்பட்டுள்ளன.

9.13 வேற்றுப்பொருள் கலந்த குறைகடத்திகளின் மின்கடத்துந்திறன்

மிகக் குறைந்த வெப்பநிலைகளில் குறிப்பாய்ச் சுழிகெல்வின் வெப்பநிலைக்கு அருகில் வேற்றுப்பொருள் அணுக்களில் ஒருசில அணுக்களே அயனிகளாக ஆக்கப்படுகின்றன. அதனால் மின்கடத்துந்திறன் ‘σ’ குறைவாயுள்ளது. ஆனால், வெப்பநிலை உயரும்போது மிகுதியான வேற்றுப்பொருள் அணுக்கள் அயனிகளாய் ஆக்கப்படுகின்றன. அதனால், மின்கடத்துந்திறன்மிகுதியாகிறது.

படம் 9.14 இல் $\log \sigma$ வுக்கும், வெப்பநிலை தலைகீழிக்கும் $\left(\frac{1}{T}\right)$ உள்ள தொடர்பினை விளக்கும் வரைபடம் ஒன்று வரையப்பட்டுள்ளது. சுழிகெல்வின் வெப்பநிலையிலிருந்து வெப்பநிலை சிறிதுசிறிதாய்க் கூடும்பொழுது வேற்றுப்பொருளில் மிகுதியான அணிக்கோவைச் சிதறல்கள் இருப்பதாலும், குறைவான மின்னூட்டக் கடத்திகளாலும் σ வின் மதிப்பு மெதுவாய் உயருகிறது. வெப்பநிலை உயர்ந்து அனைத்து வேற்றுப்பொருள் அணுக்கள் அயனிகளாய் ஆக்கப்படும்போது மின்னூட்டக் கடத்திகளின் நகர்வுதிறன் சிறிது குறைகிறது. ஏனெனில், அப்பொழுது மிகுதியான அணிக்கோவைச் சிதறல்கள் இருக்கின்றன. அதனால் வரைகோடு சிறிது கீழ்நோக்கி நகர்கிறது. அதனால், σ வின்

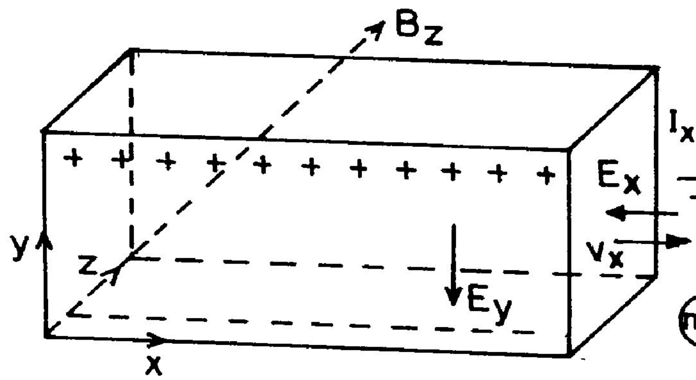


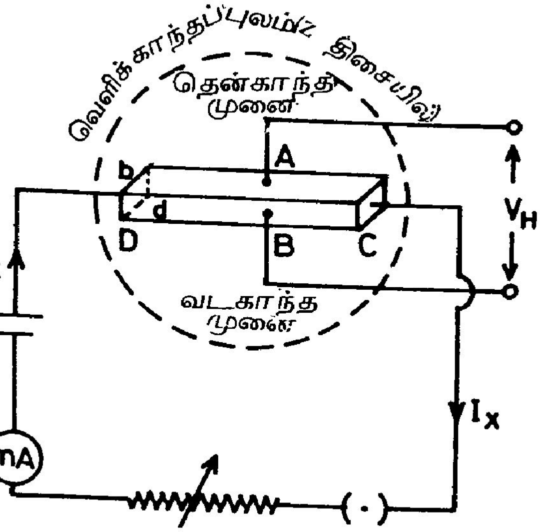
படம் 9.14 வேற்றுப் பொருள் கலந்த குறைகடத்தியில் மின்கடத்துந் திறனுக்கும் வெப்பநிலையின் தலைகீழிக்கும் இடையே வரையப்பட்ட வரை

மதிப்பு சிறிதளவு குறைகிறது. மிக அதிகமான வெப்பநிலைகளில் வெப்பக்கிளர்ச்சியினால் மிகுதியான மின்னூட்டக் கடத்திகள் தோன்றுகின்றன. அதனால், மின்கடத்துந்திறன் மிக அதிக அளவில் உயர்கிறது. வெப்பநிலை உயரும்போது அணிக்கோவைச் சிதறல்களும் கூடி, மின்னூட்டக் கடத்திகளின் நகர்வு திறனை மேலும் குறைத்தாலும் வெப்பக் கிளர்ச்சியினால் மிகுதியான மின்னூட்டக் கடத்திகள் தோன்றி, இக்குறையைச் சரிசெய்கின்றன. நடைமுறையில் மிக உயர்ந்த வெப்பநிலையில் வேற்றுப்பொருள் கலந்த குறைகடத்தி இயல்பாய அல்லது தூய குறைகடத்தி போல் செயல்படும்.

9.14 உறால் விளைவு

ஒரு குறைகடத்தி '*N*' வகையைச் சார்ந்ததா அல்லது '*P*' வகையைச் சார்ந்ததா என்று தெரிந்துகொள்ளுதல் சிலநேரங்களில் மிக முக்கியமானதாயிருக்கும். அப்பொருளின் மின்கடத்துந் திறனை அளந்தறிந்தால்மட்டும் இதனை வரையறுக்கமுடியாது. ஏனெனில், மின்கடத்துந்திறன் எலெக்ட்ரான்களால் உண்டானதா அல்லது துளைகளால் உண்டானதா என அறிந்துகொள்ள முடியாது. உறால் விளைவினைப் பயன்படுத்தி நாம் இந்த இருவகைப் பொருள்களையும் வேறுபடுத்திக் காணமுடியும். இந்த விளைவினால் மேலும் பல பயன்கள் உள. ஒருமின்கடத்தியில் செல்லும் மின்னோட்டத்திற்குச் செங்குத்தாய் ஒருவெளிக் காந்தப்புலத்தைச் செலுத்தினால் மின்னோட்டத்திசை, காந்தப்புலத்திசை என்னும் இருதிசைகளுக்கும் செங்குத்தாய் மூன்றாம் திசையில் ஒரு சிறிய மின்னழுத்த வேறுபாடு தோன்றும். இச்சிறிய மின்னழுத்த வேறுபாட்டால் ஒரு மின்புலம் தோன்றுகிறது. இதுவே உறால் விளைவு ஆகும்.





படம் 9.15 உறால் விளைவை விளக்கும் படம். படம் 9.16 உறால் மின்னழுத்தத்தை அளவிடல்.

படம் 9.15இல் காட்டியவாறு ஒருசெவ்வகப் பாளமாயமைந்த ஒருபொருளை எடுத்துக்கொண்டு, அதில் வெளிமின்புலம் 'E_x' திசையில் இருப்பதாயும் மேலும்,

அப்பொருள் z திசையில் செல்லும் ஒரு வெளிக்காந்தப்புலத்தில் 'B_z' இருப்பதாயும் கொள்வோம். மின்னோட்டச் செறிவு J_x, மின்புலமாகிய E_x உள்ள திசையில் இருக்கும். குறிப்பாய்ப் பொருளில் மின்னூட்டக் கடத்தியாய் எலெக்ட்ரான் மட்டும் உள்ளதாய்க் கொள்வோம். அதனால், x திசையில் எலெக்ட்ரான்கள் v_x என்ற நகர்வு வேகத்தில் படத்திற்காட்டியவாறு செல்லும். வெளிக்காந்தப்புலத்தின் விளைவினால், நகரும் எலெக்ட்ரான்களில் லாரன்ஸ் விசை உண்டாகும். லாரன்ஸ் விசையைப் பின்வருமாறு எழுதலாம் :

$$\vec{F} = e(\vec{v} \times \vec{B})$$

இந்த விசையின் எண்ணளவு (scalar magnitude) Bev ஆகும். இவ்விசையினால் ஒவ்வோர் எலெக்ட்ரானும் கீழ்நோக்கிய திசையில் நகரும். அதனால், பொதுவாய்ப் பொருளின் மேற்புறப் பரப்பில் நேர்க்குறி உடைய மின்னூட்டக் கடத்திகளும், கீழ்ப்புறப்பரப்பில் எதிர்க்குறி உடைய மின்னூட்டக் கடத்திகளும் சேகரிக்கப்படுகின்றன. மாறா நிலையை அடைந்தவுடன் எதிர்க்குறி, நேர்க்குறி உடைய மின்னூட்டக் கடத்திகள் தனித்தனியாய்ப் பிரிக்கப்பட்டு எதிரெதிர் பக்கங்களில் இருப்பதால் ஒருமின்னழுத்த வேறுபாடு தோன்றுகிறது. இதனையே நாம் **உறால் மின்னழுத்தம்** எனக் கூறுகிறோம். அதனால் ஒரு மின்புலம் E_y தோன்றுகிறது. அதன்திசை படத்திற் காட்டியவாறு மேலிருந்து கீழாயிருக்கும்.

அதே சமயம் மின்னூட்டக் கடத்திகளாய்த் துளைகள் இருந்தால், மேற்புறப் பரப்பில் எதிர்க்குறி உடைய எலெக்ட்ரான்களும் கீழ்ப்புறப்பரப்பில் நேர்க்குறி உடைய துளைகளும் சேகரிக்கப்படும். அதனால், உறால் மின்னழுத்தத் திசையையும், அளவையும் y திசையில் கண்டுபிடிப்பதன்மூலம் எவ்வகை மின்னூட்டக் கடத்திகள் ஒரு பொருளில் உள்ளன என்ற தகவலைப் பெறலாம்.

9.15 உறால் மின்னழுத்தமும், உறால் குணகமும்

படம் 9.15இல் காட்டியவாறு ஓர்எலெக்ட்ரானின்மீது உள்ள மின் விசை $= -e\,E_y$ இங்கு எதிர்க்குறி சேர்க்கப்பட்டிருப்பதற்குக் காரணம், எலெக்ட்ரான்களில் எதிர்க்குறி மின்னூட்டம் இருப்பதே ஆகும். காந்தத் தூண்டலால் எலெக்ட்ரான்மீது உண்டாகும் விசை $= -e(\vec{v} \times \vec{B}) = e\,v_x\,B_z$

ஏனெனில், $\vec{v} \times \vec{B}$ என்பது ஒருவெக்டார் குறுக்குப் பெருக்கற்பலனாகும் : அதன் மதிப்பு $-v_x\,B_z$ ஆகும். அந்த எலெக்ட்ரான் சமநிலையில் இருக்க அதன் மீதுள்ள மொத்த விசை சுழியாயிருக்கவேண்டும். அஃதாவது, $F_y = -e\,E_y + e\,v_x\,B_z = 0$.

$$\therefore E_y = v_x\,B_z \qquad (9.34)$$

இதில் 'E_y' என்பது உறால் மின்புலச் செறிவு; 'd' என்பது பொருளின் தடிமனாகவோ அல்லது உயரமாகவோ இருந்தால் பின் உறால் மின்னழுத்தம்,

$$V_H = E_y\,d = d\,v_x\,B_z \qquad (9.35)$$

அதனால் உறால் மின்னழுத்தத்தையும், காந்தத் தூண்டலையும், பொருளின் உயரத்தையும் கண்டுபிடித்தால் மின்னூட்டக் கடத்திகளின் நகர்வு வேகத்தின் அளவும், திசையும் கிடைக்கும். நகர்வு வேகத்தின் திசையைக் கண்டுபிடித்தால் உடனே மின்னூட்டக் கடத்தியின் குறியைக் கண்டுபிடித்துவிடலாம்.

மேலும், மின்னோட்டச் செறிவு $J_x = -ne\,v_x$ இங்கு n என்பது ஓரலகு பருமனில் உள்ள மொத்த மின்னூட்டக் கடத்திகளாகும்.

$$\therefore\ v_x = \frac{-J_x}{ne}.\ \text{எனவே}\ \ E_y = \frac{-J_x}{ne}B_z$$

சமன்பாட்டின் இருபக்கமும் மாற்றியமைக்க நமக்குக் கிடைப்பது

$$\frac{E_y}{J_x B_z} = \frac{-1}{ne} = R_H$$

இங்கு R_H என்பது உறால் குணகமாகும்.

$$\text{எலெக்ட்ரான்களுக்கு}\ R_H = \frac{-1}{ne};\ \ \text{துளைகளுக்கு}\ R_H = \frac{1}{ne} \tag{9.36}$$

9.16 நகர்வுதிறன், உறால் கோணம்

மின்னூட்டக் கடத்திகளின் நகர்வுதிறனைப் பின்வருமாறு எழுதலாம்.

$$\mu_H = \frac{v_x}{E_x}$$

இங்கு μ_H என்பது உறால் நகர்வு திறனாகும்.

$$v_x = \mu_H E_x$$

$$E_y = v_x B_z = B_z \mu_H E_x = R_H J_x B_z \tag{9.37}$$

எனவே,

$$\mu_H = \frac{R_H J_x B_z}{B_z E_x} = \frac{R_H J_x}{E_x}$$

ஆனால்,

$$\frac{J_x}{E_x} = \sigma.\ \ \text{எனவே}\ \ \mu_H = \sigma R_H \tag{9.38}$$

அதனால் நாம் மின்கடத்துந்திறனையும், R_H யும் கண்டுபிடித்தால் மின்னூட்டக் கடத்திகளின் ஹால் நகர்வு திறனைக் கண்டுபிடிக்கலாம். இந்த ஹால் நகர்வு திறன்

வெளிமின்புலத்தின் உதவியால்வரும் நகர்வு திறனுக்கு மாறுபட்டுள்ளது. ஏனெனில், மின்னூட்டக் கடத்திகள், ஆற்றல்பட்டைகளில் வெவ்வேறு ஆற்றல் மட்டங்களில் இருப்பதால் அவற்றின் வேகங்கள் வெவ்வேறாய் இருக்கலாம். ஒருகுறிப்பிட்ட வலிமையுடைய காந்தப் புலத்தில் வேகம் மிகுந்த மின்னூட்டக்கடத்திகள் மிகுதியாய் விலக்கம் அடையும். அதனால் வலிமை மிகுந்த காந்தப்புலம் செயற்படும்போது ஹால் குணகம் கணக்கிடப்பட்டு அதிலிருந்து மின்னூட்டக் கடத்திகளின் நகர்வு திறன் கணக்கிடப்பட்டால் அது சரியாயிருக்கலாம். ஏனெனில், மிகுந்த வலிமையுடைய காந்தப் புலத்தில் எல்லா மின்னூட்டக் கடத்திகளும் மிகுந்த விலக்கம் அடைந்து, தனித்தனியே ஒதுங்கிவிட வாய்ப்பு அதிகமிருக்கிறது.

ஹால் கோணத்தைப் பின்வருமாறு கூறலாம்.

$$\tan \theta_H = \frac{E_y}{E_x} = \frac{\text{உறால் மின்புலம்}}{\text{வெளி மின்புலம்}}$$

சமன்பாடு (9.37)ன் படி $E_y = B_z \mu_H E_x$

$$\therefore \tan \theta_H = B_z \mu_H \tag{9.39}$$

9.17 ஹால்விளைவின் முக்கியத்துவமும், பயன்களும்

1. மின்னூட்டக்கடத்திகள் நேர்க்குறி உடையனவா அல்லது எதிர்க்குறி உடையனவா எனக் கண்டுபிடிக்கலாம்.
2. ஹால் குணகத்தின் மதிப்பினைக்கொண்டு ஓரலகு பருமனில் உள்ள மொத்த மின்னூட்டக் கடத்திகளின் எண்ணிக்கையைக் கண்டுபிடிக்கலாம்.
3. நகர்வுதிறனை நேராகவே அளக்கலாம். ஏனெனில்,

$$\mu_H = \frac{E_y}{B_z E_x}$$

இதில் E_y, E_x, B_z ஆகிய மூன்றனையும் மின்னணுவியற் கருவிகளால் நேராயளந்து, μ_H இன் மதிப்பினை உடனே கண்டுகொள்ளலாம்.

4. ஒருபொருள் மின்கடத்தியா அல்லது குறைகடத்தியா அல்லது மின்கடத்தாப் பொருளா எனத் தீர்மானிக்க இவ்விளைவினைப் பயன்படுத்தலாம்.

(அ) மின்கடத்திகளாயுள்ள அநேக உலோகங்களில் ஹால் குணகம் எதிர்க்குறி உடையதாயிருக்கிறது. அதனால், உலோகங்களில் மின்னூட்டக் கடத்திகள் எலெக்ட்ரான்கள் ஆகும்.

(ஆ) சில உலோகங்களில் குறிப்பாய்ப் பெரிலியம், துத்தநாகம், காட்மியம், அலுமினியம் ஆகியவற்றில் ஹால்குணகம் நேர்க்குறி உடையதாயிருக்கிறது. இதனைப் பின்வருமாறு விளக்கலாம். திண்மப் பொருள்களின் பட்டைக்

கொள்கைப்படி, ஏறத்தாழ நிரப்பப்பட்ட இணைதிறப் பட்டையை உடைய பொருள்களில் எதிர்நிறையை உடைய எலெக்ட்ரான்கள் அல்லது துளைகள் மின்கடத்துகின்றன. அதனால், ஹால் குணகம் நேர்க்குறி உடைதாயுள்ளது.

(இ) 'N' வகை குறைகடத்திகளில் பெரும்பான்மை மின்னூட்டக்கடத்திகள் எலெக்ட்ரான்கள் ஆகும். அதனால் ஹால் குணகமும் எதிர்க்குறி உடையதாயிருக்கும். அதேபோல் 'P' வகைக் குறைகடத்திகளில் ஹால் குணகம் நேர்க்குறி உடையதாயிருக்கும். ஏனெனில், அதில் பெரும்பான்மையான மின்னூட்டக் கடத்திகள் துளைகளாகும். நாம் முன்பு மின்னூட்டக் கடத்திகளின் அடர்த்தியாக $n = \frac{1}{e\,R_H}$ எனக் கண்டோம்.

ஆனால், இம்மதிப்பு மின்னூட்டக் கடத்திகள் ஆற்றல்பட்டைகளில் ஈர்ப்பு விசைகளின்றி இருக்கும்போதும், அவை ஒருமாறா நகர்வு வேகத்துடன் செல்லும்போதும்தான் பொருத்தமாயிருக்கும். ஆனால், குறைகடத்திப் பொருள்களில் இந்த இருநிபந்தனைகளும் இருக்க முடியாது. அதனால், பல்வேறு பரிசோதனைகளின் முடிவுகள் பகுப்பாய்வு செய்யப்பட்டுக் கீழ்க்காணும் செயல்முறைவாய்பாடு (working formula) தருவிக்கப்பட்டுள்ளது.

$$n = \frac{3\pi}{8} \cdot \frac{1}{e\,R_H} \tag{9.40}$$

(ஈ) இருவகை மின்னூட்டக் கடத்திகளும், ஏறத்தாழச் சமமான அளவில் இயல்பாய குறைகடத்தியில் உள்ளதுபோல் இருக்குமானால், பின்

ஹால் - குணகம்
$$R_H = \frac{(p\,\mu_h^2 - n\,\mu_e^2)}{e\,(p\,\mu_h + n\,\mu_e)^2} \tag{9.41}$$

இதில், n, p முறையே எலெக்ட்ரான், துளை ஆகியவற்றின் செறிவுகளாகும். μ_e, μ_h முறையே எலெக்ட்ரான், துளை ஆகியவற்றின் நகர்வுதிறன்களாகும். தூய குறைகடத்தியில் $n = p$ என்று இருந்தாலும் துளை நகர்வு திறனுக்கும், எலெக்ட்ரான் நகர்வு திறனுக்கும் சிறிது வேறுபாடு இருப்பதால், நமக்குச் சிறிது ஹால் மின்னழுத்தம் கிடைக்கும்.

(உ) குறைகடத்திகளின் வெப்பநிலை மாறுபட்டால் ஹால் விளைவிலும் சிறிது மாற்றம் உண்டாகிறது. ஏனெனில், குறைகடத்தியில் மின்னூட்டக் கடத்திகளின் செறிவு அதனுடைய வெப்பநிலையைச் சார்ந்துள்ளது.

(ஊ) ஹால் விளைவில் தோற்றுவிக்கப்படும் ஹால் மின்னழுத்தம், காந்தத் தூண்டல், மின்னோட்டம் ஆகியவற்றின் குறுக்குப் பெருக்கற்பலனுக்கு (cross product) நேர்விகிதத்திலிருப்பதால் இந்த ஹால் மின்னழுத்தம் நுண்ணலைத்திறன் பகுப்பானாக (microwave power detector)ப் பயன்படுத்தப்படுகிறது.

9.18 பரிசோதனைமூலம் ஹால் குணகம் கண்டுபிடித்தல்

படம் 9.16இல் காட்டியவாறு 'x' திசையில் கிடத்தப்பட்டதும், சில மில்லிமீட்டர் அகலமும், சில சென்டி மீட்டர் நீளமும் உடையதுமான ஒருதுண்டில் 'x' திசையில் மின்னோட்டம் செலுத்தப்படுகிறது. மின்னோட்ட அளவினைமாற்ற மின்தடை மாற்றி ஒன்றும், மின்னோட்டத்தை அளக்க மில்லி மின்னோட்டமானியும் இதனுடன் தொடர்இணைப்பில் இணைக்கப்பட்டுள்ளன. மேலும், z திசையில் ஒருவெளிக்காந்தப்புலம் இத்துண்டிற்குள் செங்குத்தாய்ச் செலுத்தப்படுகிறது. துண்டின் A,B ஆகிய புள்ளிகள், பிழையில்லாததும், உயர் உணர்திறன் (sensitivity) உள்ளதுமான ஒருமின்னழுத்தமானியில் இணைக்கப்படுகின்றன. இதனால் ஹால் மின்னழுத்தத்தைத் துல்லியமாயும், சரியாயும் கண்டுபிடிக்கலாம். பொதுவாய் ஹால் மின்னழுத்தம் 0.1 லிருந்து 10 மைக்ரோ வோல்ட்டு வரை இருக்கும். அதனால் வெப்ப விளைவுகளில் ஏற்படும் சீபெக் விளைவு போன்ற சிறு மின் அழுத்தங்கள் இவ்வகை அளவீடுகளைக் கடினமாக்குகின்றன. மின்புலத்திசையை மாற்றி மறுபடியும் அளவீடுகள் செய்வதன்மூலம் அவற்றால் வரும் பிழைகளைத் தவிர்க்கலாம். ஹால் மின்னழுத்தத்தை அளப்பதால், ஹால் குணகத்தைப் பின்வருமாறு காணலாம். குறிப்பாய் ஒருபொருளில் எலெக்ட்ரான்கள் மின்னூட்டக் கடத்திகளாயிருக்கும்பொழுது ஹால் மின்புலம் $E_y = \frac{-1}{ne} J_x B_z$. இங்கு $J = \frac{I}{b\,d}$; இதில் 'I' என்பது பொருளின் வழியே செல்லும் மின்னோட்டம்; 'b' என்பது பொருளின் அகலம்; 'd' என்பது பொருளின் தடிமனாகும். இவையனைத்தையும் உடனே அளந்து விடலாம்;

$$\therefore E_y = \frac{-IB_z}{ne\,bd}$$

$$\text{ஹால் மின்னழுத்தம் } V_H = E_y\, d = \frac{-IB_z}{neb} = \frac{R_H IB_z}{b}$$

$$\therefore R_H = \frac{bV_H}{IB_z} \qquad (9.42)$$

குறிப்பு : வெப்பச் சரிவினாலும், சரியான இணைப்பெறுமை (alignment) இல்லாததாலும் சில பிழைகள் நேரும். இவற்றை நீக்க மின்னோட்டத்தை எதிர்த்திசையில் மாற்றி வெளிக்காந்தப் புலத்தின் திசைகளை முதலில் 'z' திசையில் நேராயும், பின் கீழ்நோக்கியும் செலுத்தி, ஒவ்வொரு முறையும் ஹால் மின்னழுத்தத்தை அளந்து, அதன் சராசரி மதிப்பினைக் கண்டுபிடிக்க வேண்டும்.

9.19 மின்னூட்டக்கடத்திகளின் வாழ்வு நேரம்

ஒரு நேர்மின்னூட்டக் கடத்தி மற்றொரு எதிர்மின்னூட்டக் கடத்தியுடன் ஒன்றிவிடு (recombination) முன் அது குறைகடத்தியினுள் இருக்கும் நேரம் அதன் வாழ்வு நேரம் (life time) எனப்படும். ஓர் எலெக்ட்ரான் ஒரு துளையுடன் ஒன்றிடும்முன் கடத்துப்

பட்டையில் அது தங்கிவிடும் நேரம் அந்த எலெக்ட்ரானின் வாழ்வு நேரம் (τ_n) எனப்படும். அதேபோல் ஒரு துளை ஓர் எலெக்ட்ரானுடன் ஒன்றிடும்முன் இணைதிறப் பட்டையில் அஃது இருக்கும் நேரம் அந்தத் துளையின் வாழ்வு நேரம் (τ_p) எனப்படும். டிரான்சிஸ்டர்கள் செய்யப்பயன்படும் குறைகடத்திகளில் எலெக்ட்ரான், துளை ஆகியவற்றின் வாழ்வுநேரம், ஏறத்தாழ 10^{-8} செகண்டிலிருந்து 10^{-3} செகண்டுவரை உள்ளது. அக்குறைகடத்தியின் மின்கடத்துந்திறன் கூடினால் மின்னூட்டக் கடத்திகளின் வாழ்வு நேரம் குறைகிறது. ஏனெனில், 'P' வகை, 'N' வகை வேற்றுஅணுக்களைக் குறைகடத்தியில் கலக்கும்பொழுது அவை ஒன்றிடும் மையங்களாய் (recombination centres) விளங்குகின்றன. மேலும், மின்னூட்டக்கடத்திகளின் வாழ்வுநேரம், பொருளின் தூய்மையையும், வெப்பநிலையையும், புறப்பரப்பின் நிலையையும் சார்ந்துள்ளது. இந்த வாழ்வு நேரத்தை ஒன்றிடும் வீதத்தின் (recombination rate) தலைகீழ் மதிப்பாய்க் கொள்ளலாம். ஒருமின்னூட்டக் கடத்தி ஒன்றிடுமுன்பு அஃது ஊடுருவிச் செல்லும் நீளம் '**விரவல் நீளம்** (diffusion length)' எனப்படுகிறது. விரவல் நீளத்திற்கும் வாழ்வு நேரத்திற்கும் உள்ள தொடர்பு கீழே கொடுக்கப்பட்டுள்ளது.

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \text{ மீ}; \quad L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \text{ மீ}$$

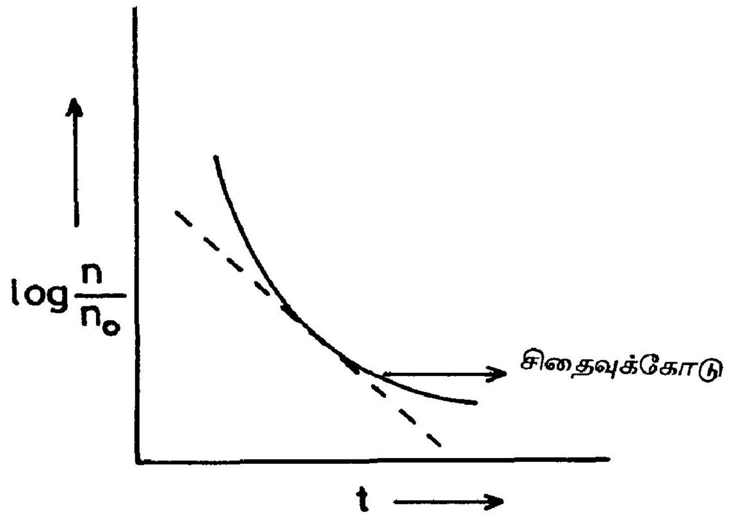
D_n, D_p ஆகியவை முறையே எலெக்ட்ரான், துளை ஆகியவற்றின் விரவல் மாறிலிகள் (diffusion constants) ஆகும். விரவல் நீளமானது வாழ்வு நேரத்தின் வர்க்கமூலத்திற்கு நேர்விகிதத்திலிருக்கிறது. மேலும், ஓர்எலெக்ட்ரான் ஒருதுளையுடன் ஒன்றிடும் வாய்ப்பு எலெக்ட்ரான் எண்ணிக்கைக்கும் நேர்விகிதத்திலிருக்கிறது. ஜெர்மேனியத்தில் மின்னூட்டக் கடத்திகளின் வாழ்வு நேரம் 400 மைக்ரோ செகண்டிலிருந்து, 200 மைக்ரோ செகண்டு வரை இருக்கும். சிலிக்கானில் மின்னூட்டக் கடத்திகளின் வாழ்வு நேரம் 500 மைக்ரோ செகண்டிலிருந்து 30 மைக்ரோ செகண்டு வரை இருக்கும்.

நாம் இங்கு முக்கியமாய் எடுத்துக்கொள்வது சிறுபான்மை மின்னூட்டக் கடத்திகளின் (minority carriers) வாழ்வுநேரம் பற்றி ஆகும். அஃதாவது, உதாரணமாக 'p' வகைக் குறைகடத்திகளில் உள்ள எலெக்ட்ரான்களின் வாழ்வு நேரம் பற்றி ஆகும். சிறுபான்மை மின்னூட்டக் கடத்திகளின் செறிவை ஒளிக்கதிர்வீச்சால் மிகுதிப்படுத்தலாம். படு ஒளிக்கதிரைக் குறைகடத்தியின்மேல் விழாமல் தடுத்தால் அதனால் உண்டாக்கப்பட்ட மிகுதி மின்னூட்டக் கடத்திகள் (excess charge carriers) அல்லது சிறுபான்மை மின்னூட்டக் கடத்திகள் உடனே ஒன்றி மறைந்துவிடுகின்றன. அஃதாவது, 'p' வகைக் குறைகடத்தியின் கடத்துப் பட்டையிலுள்ள மிகுதி எலெக்ட்ரான்கள் இணைதிறப் பட்டைக்குத் திரும்பி அங்குள்ள மிகுதித் துளைகளுடன் ஒன்றிவிடுகின்றன. மிகுதி மின்னூட்டக் கடத்திகளின் செறிவு ஒருகுறிப்பிட்ட நேரத்தில் $\exp(-t/\tau)$ க்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது என்று கண்டுபிடிக்கப்பட்டுள்ளது. அதனால், ஒளிக்கதிர் வீச்சினைத் தடுத்தவுடன் மிகக்குறுகிய காலத்தில் அனைத்து மிகுதி மின்னூட்டக் கடத்திகளும் மறைந்துவிடுகின்றன. இதிலிருந்து வாழ்வு நேரத்தைப் பின்வருமாறு வரையறுக்கலாம். ஒருமின்னூட்டக் கடத்தியின் வாழ்வு நேரம் (τ), மிகுதிமின்னூட்டக் கடத்திகளின் செறிவு அதன் தொடக்கநிலை மதிப்பிலிருந்து $1/e$ மதிப்பிற்குவர எடுத்துக்கொள்ளும் நேரமாகும்.

மிகுதி மின்னூட்டக் கடத்திகளின் வாழ்வு நேரத்தைக் கணக்கிடல் :

n_o என்பது ஒளிக்கதிர்வீச்சினை நிறுத்திய உடன் உள்ள மிகுதி மின்னூட்டக் கடத்திகளின் செறிவு என வைத்துக்கொள்வோம். 't' செகண்டு கழிந்தபின்பு மிகுதி மின்னூட்டக் கடத்திகளின் செறிவைப் பின்வருமாறு எழுதலாம்.

$$n = n_o\, e^{-t/\tau}$$



படம் 9.17 மிகுதி மின்னூட்டக்கடத்திகளின் செறிவுக்கும், காலத்திற்கும் உள்ள தொடர்பினைக் காட்டும் வரைபடம்.

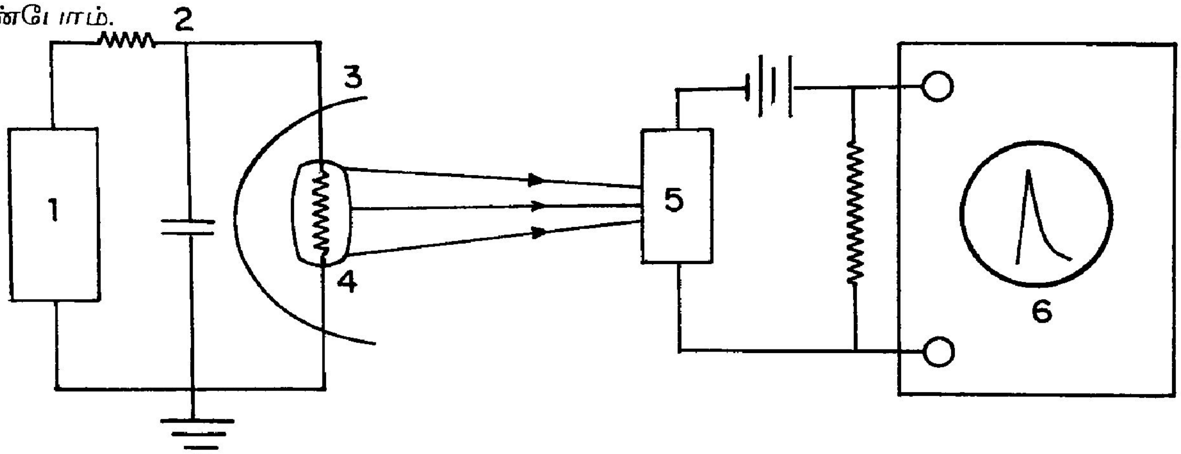
இருபக்கமும் மடக்கைகளை எடுக்க $\log \frac{n}{n_o} = \frac{-t}{\tau}$; $\log n/n_o$ க்கும், t க்கும் இடையே ஒருவரைபடம் வரைந்தால் அஃது ஏறத்தாழ ஒரு நேர்க்கோடாயிருக்கும் [படம் 9.17]. அதன் சாய்வு $\frac{1}{\tau}$ ஆகும்.

$$\text{ஆனால்,}\quad \frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_B} + \alpha_o^2 D$$

இதில் 'D' என்பது விரவல் மாறிலியாகும். 'α_o' என்பது புறப்பரப்பில் ஒன்றிடும் செயல்முறையின் திசைவேகமாகும் (recombination velocity). அதனால் சிதைவுக் கோட்டின் சாய்விலிருந்து கிடைக்கும் வாழ்வு நேரம் இருபகுதிகளைக் கொண்டது. முதற்பகுதி ஒருமின்னூட்டக்கடத்தி அதன் எதிரான மின்னூட்டக்கடத்தியுடன் ஒன்றிடும் முன்அது குறைகடத்தியில் இருக்கும் வாழ்வு நேரத்தைக் குறிக்கிறது. இதனை τ_B எனக் குறித்திருக்கிறோம். இரண்டாம் பகுதி புறப்பரப்பில் நடக்கும் ஒன்றிடும் செயல்முறையால் வருகிறது. அதன் திசைவேகம் சுழியாயிருந்தால் ($\alpha_o = 0$), பின்

$$\frac{1}{\tau}=\frac{1}{\tau_B} \quad (\text{அல்லது}) \quad \tau=\tau_B$$

இனிச் சிதைவுக் கோட்டை (decay line) எவ்வாறு வரையலாம் எனச் சிறிது காண்போம்.



1. உயர் மின்னழுத்தத்திறன் அளிப்பி 2. மின்தேக்கிச் சுற்று 3. பிரதிபலிப்பான் 4. சீனான் விளக்கு 5. சோதனைப்பொருள் 6. எதிர்முனைக்கதிர் அலைபதிப்பி

படம் 9.18 மிகுதி மின்னூட்டக்கடத்திகளின் வாழ்வு நேரத்தை அளவிடல்

படம் 9.18இல் காட்டியவாறு பரிசோதனைக்கு உட்படுத்தப்பட்ட பொருளைச் சுற்றில் இணைக்க வேண்டும். ஒருசீனான் விளக்கு அப்பொருளைக் கிளர்ச்சியுறச் செய்கிறது. இவ்விளக்கிலிருந்து வரிசையாய் ஒளித்தெறிப்புகள் (light pulses) வந்து, ஒவ்வொரு தெறிப்பும் 10^{-6} செகண்டுவரை நிலைத்திருக்கிறது. விளக்கின் பின் உள்ள பிரதிபலிப்பான் உதவியால் அப்பொருளில் மிகுதியான ஒளி படுமாறு அமைக்கப்பட்டுள்ளது. அஃதாவது, நீள்வட்ட (elliptical) வடிவிலுள்ள பிரதிபலிப்பானின் ஒருகுவியத்தில் விளக்கும், அதன் மற்றொரு குவியத்தில் பொருளும் வைக்கப்பட்டுள்ளன. அதனால், பொருள்மீது மிகுந்த செறிவுள்ள ஒளிபட வாய்ப்புக் கிடைக்கிறது. ஒருமின்தேக்கிச் சுற்றின் உதவியால் சீனான் விளக்கிலிருந்து வரிசையாய் ஒளித் தெறிப்புகள் கிடைக்கின்றன. ஒளி உட்கவர்தலால் உண்டாகும் மிகுதி மின்னூட்டக் கடத்திகளின் செறிவால் வரும் மின்னோட்டச் சிதைவின் வடிவம் உயர் அதிர்வெண் எதிர்முனைக்கதிர் அலைபதிப்பி (high frequency cathode ray oscilloscope)யில் கிடைக்கிறது. அதில் காணும் கோட்டின் சாய்வினால் வாழ்வு நேரத்தைக் கணக்கிடலாம். இம் முறையினால் வாழ்வு நேரம் கண்டுபிடிக்க வேண்டுமானால், வாழ்வு நேரம் 10^{-6} செகண்டுக்குமேல் இருக்கவேண்டும். 10^{-6} செகண்டுக்குக் குறைவான வாழ்வு நேரங்களைக் கணக்கிடத் தனி ஒளிப்பொறிக் குழாய்கள் பயன்படுத்தப்படுகின்றன.

9.20 குறைகடத்திகளில் ஒன்றிடும் மையங்களும், கண்ணிகளும்

ஒருகுறைகடத்தியில் பல வழிகளில் எலெக்ட்ரான்களும், துளைகளும் ஒன்றிணைந்து நடுநிலை அல்லது மின்னூட்டமற்ற தன்மையை அடைகின்றன. அவ்வாறு அடையப்பல

வழிகள் உள. அதில் ஒருவழி மோதுகை (collision) நிகழ்ச்சியாகும். அஃதாவது, எலெக்ட்ரானும், துளையும் ஒன்றனோடு ஒன்று மோதி அதன்மூலம் ஒன்றுசேரும்போது ஒருகவள ஆற்றலை அல்லது போட்டான் ஒன்றினை வெளியிடுகின்றன. இவ்வொன்றிடும் நிகழ்ச்சியை **அழிவுறும் நிகழ்வு** (annihilation) என்கிறோம். அழிவுறும் நிகழ்வு, தோன்றல் நிகழ்வு (creation)க்கு எதிரானதாகும். தோன்றல் நிகழ்வின் போது, இணைதிறப் பட்டையிலுள்ள எலெக்ட்ரான் ஒருகவள ஆற்றலை ஒளிக்கதிர் அல்லது வேறு வழியில் உட்கவர்ந்து கடத்துப் பட்டைக்குச் செல்கிறது. அதனால் கடத்துப் பட்டையில் ஓர்எலெக்ட்ரானும், இணைதிறப்பட்டையில் ஒருதுளையும் தோன்றுகின்றன. மேற்கண்ட நிகழ்ச்சிகளை ஒரேசமன்பாட்டில் பின்வருமாறு எழுதலாம்.

$$\text{எலெக்ட்ரான் + துளை} \rightleftarrows \text{ஒரு கவள ஆற்றல்}$$

பெரும்பாலும் அழிவுறும் நிகழ்வின்போது இந்த ஒரு கவள ஆற்றல் γ– கதிராகவோ, ஏதாவதொரு மின்காந்த அலையாகவோ வெளிவரலாம். கடத்துப் பட்டையிலுள்ள எலெக்ட்ரான் இணைதிறப்பட்டையிலுள்ள ஏதாவதொரு துளையில் ஒன்றுசேர்ந்து ஒரு கவள ஆற்றலை வெளியிடலாம். ஆனால், எலெக்ட்ரான் கடத்துப் பட்டையிலிருந்து நேராய் இணைதிறப்பட்டைக்குப் பெயரும்போது மிகுதியான ஆற்றல் வெளிவரும். எனினும், இந்நிகழ்ச்சியின் நிகழ்தகவு மிகக் குறைவாயிருக்கும். விலக்கப்பட்ட ஆற்றல் பட்டைகளில் உள்ள சில ஆற்றல் மட்டங்களால் இந்த ஒன்றிடும் நிகழ்ச்சியைச் செயலாற்றமுடியும் இந்த ஆற்றல் மட்டங்களே **ஒன்றிடும் மையங்கள்** (recombination centres) ஆகும். இந்த ஆற்றல் மட்டங்கள் படிக அணிக்கோவையில் தோன்றும் நிலைமாறுபாடுகளாலும் (phase changes), படிக இயலமைப்பில் உள்ள குறைகளாலும், படிகத்தில் உள்ள வேற்றுப்பொருள் அணுக்களாலும் ஆற்றல் இடைவெளியில் தோன்றுகின்றன. எலெக்ட்ரான்கள் கடத்துப் பட்டையிலிருந்து ஒன்றிடும் மையங்களில் விழும்போது மிகக்குறைந்த ஆற்றலுடைய போட்டான்கள் வெளிப்படுகின்றன. அதனால், ஒன்றிடும் மையங்கள் ஒன்றிடும் நிகழ்ச்சிக்கு மிகப் பயனுள்ளனவாயிருக்கின்றன.

கண்ணிகள் அல்லது பிடிப்பான்கள் (traps) படிகத்தில் உள்ள ஒருவிதக் குறைபாடுகளாகும். அணிக்கோவையின் இயலமைப்பில் குறைவான அல்லது மிகுதியான அணுக்கள் இருந்தாலோ, சில குறைபாடுகள் இருந்தாலோ அங்கெல்லாம் இக்கண்ணிகள் உள. கண்ணிகளின் ஆற்றல் மட்டங்கள் ஆற்றல் இடைவெளியின் மையத்திற்கு அருகில் இருப்பதாய்ப் பரிசோதனைமூலம் கண்டுபிடிக்கப்பட்டுள்ளன. கண்ணிகளும் ஒன்றிடும் நிகழ்ச்சிக்கு மிக உதவிபுரிகின்றன. அஃதாவது, கடத்துப் பட்டையிலிருந்துவரும் எலெக்ட்ரானைப் பிடித்துவைத்துக்கொண்டு பின் அதனை இணைதிறப்பட்டைக்கு அனுப்புகிறது. கண்ணிகளின் வழியே நடக்கும் ஒன்றிடும் நிகழ்ச்சி வேற்றுப்பொருள் கலந்த குறைகடத்திகளில் மிக அதிக அளவில் உள்ளதாய்க் கண்டுபிடிக்கப்பட்டுள்ளது. ஒருகண்ணி கடத்துப் பட்டையிலிருந்து வரும் எலெக்ட்ரானைப் பிடித்துச் சிறிது நேரம் கழிந்தபின் அதனை இணைதிறப்பட்டைக்கு அனுப்புகிறது. அதனால் கண்ணிகள் மின்னூட்டக் கடத்திகளைப் பிடிப்பதால் மின்னூட்டக் கடத்திகளில் ஒருதற்காலிக இழப்புதான் உண்டாகிறது. ஆனால், ஒன்றிடும் மையங்களால் மின்னூட்டக் கடத்திகளின்

எண்ணிக்கையில் நிலையான இழப்பு உண்டாகிறது. கண்ணிகள் தற்காலிகமாக மின்னூட்டக் கடத்திகளை நகரவிடாமல் வைப்பதால், மின்னூட்டக் கடத்திகளின் வாழ்வு நேரம் அதிகமாகிறது. ஆனால் ஒன்றிடும் மையங்கள் மூலம், மின்னூட்டக் கடத்திகளின் வாழ்வு நேரம் குறைகிறது. கண்ணிகள் எலெக்ட்ரானைமட்டும் பிடிக்காமல் துளைகளைக்கூடப்பிடித்துக் கொள்ளும். எனினும், பிடித்துக்கொள்ளப்பட்ட ஒருமின்னூட்டக் கடத்தி, சற்றுநேரம் கழித்து வெளிவிடப்படும், இவ்வாறு வெளிவந்த மின்னூட்டக் கடத்தி வேறு கண்ணியாலோ, ஒன்றிடுமையத்தாலோ பிடிக்கப்படும்வரை கட்டற்று இயங்கும்.

அதனால் ஒன்றிடும் மையங்களால் வாழ்வு நேரம் குறைவதால், கடத்துந்திறனும் குறைகிறது. கண்ணிகளால் வாழ்வு நேரம் கூடுவதால் கடத்துந்திறனும் கூடுகிறது.

9.21 தொடர்ச்சிச் சமன்பாடு (Equation of Continuity)

தொடர்ச்சிச் சமன்பாடு குறைகடத்திப்பொருளில் எலெக்ட்ரான்கள், துளைகள் ஆகியவற்றின் இயக்கங்களைப்பற்றி விரிவாகத் தெரிவிக்கின்றது. மேலும், மின்னூட்டக் கடத்திகளின் செறிவு இடத்திற்கும், காலத்திற்கும் ஏற்ப எவ்வாறு மாறுபடுகிறது என்பதையும் தெளிவாக்குகிறது. குறைகடத்திகளில் மின்னூட்ட கடத்திகள் ஒருகுறிப்பிட்ட வீதத்தில் தோற்றுவிக்கப்படுகின்றன. அதே சமயம் மின்னூட்டக் கடத்திகள் ஒன்றிணைந்து மின்நடுநிலைமையையும் அடைகின்றன.

∴ [ஒரு செகண்டில் மின்னூட்டக் கடத்திகளின் செறிவில் ஏற்படும் மாற்றம்] = [மின்னூட்டக் கடத்திகள் தோற்றுவிக்கப்படும் வீதம்] − [மின்னூட்டக் கடத்திகள் ஒன்றிடும் வீதம்]

தொடர்ச்சிச் சமன்பாட்டைப் பின்வருமாறு எழுதலாம் :

எலெக்ட்ரானுக்கு

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{n_p - n}{\tau_n} + \mu_n \frac{\partial}{\partial x}(nE) + D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}$$

துளைக்கு

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{p_n - p}{\tau_p} - \mu_p \frac{\partial}{\partial x}(pE) + D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$$

இதில் $\frac{\partial n}{\partial t} =$ எலெக்ட்ரான் செறிவு மிகுதியாகும் வீதம்; $\frac{\partial p}{\partial t} =$ துளைச் செறிவு மிகுதியாகும் வீதம்; $\frac{n_p}{\tau_n} =$ எலெக்ட்ரான் தோற்றுவிக்கப்படும் வீதம்; $\frac{p_n}{\tau_p} =$ துளை தோற்றுவிக்கப்படும் வீதம்

இதில் n_p, p_n என்பன முறையே எலெக்ட்ரான், துளை ஆகியவற்றின் சமநிலை

அடர்த்தி (equilibrium density) மதிப்புகளாகும். τ_n, τ_p என்பன முறையே எலெக்ட்ரான், துளை ஆகியவற்றின் வாழ்வு நேரங்களாகும். n, p ஆகியவை முறையே எந்த ஒரு நேரத்திலும் எலெக்ட்ரான், துளை ஒன்றிடும் வீதத்தைக் குறிக்கின்றன.

ஒவ்வொரு சமன்பாட்டிலும் வலப்பக்கம் உள்ளதில் உள்ள இரண்டாம் பகுதி மின்புலத்தில் மின்னூட்டக்கடத்திகளின் நகர்வினால் வருகிறது; மூன்றாம் பகுதி மின்னூட்டத்தின் விரவலால் வருகிறது. μ_n, μ_p முறையே எலெக்ட்ரான், துளை ஆகியவற்றின் நகர்வு திறன்களாகும். D_n, D_p ஆகியவை முறையே எலெக்ட்ரான், துளை ஆகியவற்றின் விரவல் மாறிலிகளாகும். குறிப்பாய் மின்புலம் E வெளியிலிருந்து செயல்படாமல் இருந்தால் தொடர்ச்சிச் சமன்பாடு பின்வருமாறு இருக்கும்.

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{n_p - n}{\tau_n} + D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{p_n - p}{\tau_p} + D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$$

மேலே கண்ட சமன்பாடுகள், ஒற்றைப் பரிமாணத்தில் குறிக்கப்பட்டுள்ளன. ஆனால், அநேக நேர்வுகளில் மின்னூட்டக் கடத்திகளை வெளியிலிருந்து உட்செலுத்தியோ அல்லது தோற்றுவிக்கும் பொழுதோ சிறுபான்மை மின்னூட்டக் கடத்திகளின் எண்ணிக்கையில் ஏற்படும் மாற்றம், பெரும்பான்மை மின்னூட்டக் கடத்திகளின் எண்ணிக்கையில் ஏற்படும் மாற்றத்தை விடப் பல விழுக்காடுகள் கூடுதலாயுள்ளது. அஃதாவது, மிகுதியான அளவில் சிறுபான்மை மின்னூட்டக் கடத்திகள் தோன்றுகின்றன. ஆகையால், சிறுபான்மை மின்னூட்டக் கடத்திகளின் செறிவு, வெப்பக் கிளர்ச்சியினால் மின்னூட்டக் கடத்திகள் தோற்றுவிக்கப்படும் வீதம், சிறுபான்மை மின்னூட்டக் கடத்திகள் ஒன்றிடும் வீதம், விரவலால் மின்னூட்டக் கடத்திகளின் செறிவில் ஏற்படும் மாற்றத்தின் வீதம் ஆகியவற்றைச் சார்ந்துள்ளது.

ஒரு 'P' வகைக் குறைகடத்தியை எடுத்துக்கொள்வோம். அதில் சிறுபான்மை மின்னூட்டக் கடத்திகளின் செறிவு மிகுதியாகும் வீதம் $\frac{dn}{dt} = g - R + \frac{1}{e}\frac{dJ_n}{dx}$

இதில் $\frac{dn}{dt}$ = 'P' வகைக் குறைகடத்தியில் சிறுபான்மை மின்னூட்டக் கடத்திகளான எலெக்ட்ரான்கள் மிகுதியாகும் வீதம்

g = சிறுபான்மை மின்னூட்டக் கடத்திகள் தோற்றுவிக்கப்படும் வீதம்

R = சிறுபான்மை மின்னூட்டக் கடத்திகள் ஒன்றிடும் வீதம்

இச்சமன்பாட்டின் இறுதிப் பகுதியான $\frac{1}{e}\frac{dJ_n}{dx}$ என்பது மின்னூட்டத்தின் விரவல் மூலம் வருகிறது. J_n என்பது எலெக்ட்ரானிய மின்னோட்டத்தின் அடர்த்தியாகும்.

பொதுவாய் 'g'யின் மதிப்பு வெப்ப நிலையைச் சார்ந்திருக்கும். நம்மால் $g - R = \frac{n_p - n}{\tau_n}$ எனக் கொண்டுவர முடியும். இங்கு $n_p + \Delta n = n$. இதில் 'n' என்பது எந்த ஒருநேரத்திலும் எலெக்ட்ரானின் செறிவு ஆகும். Δn என்பது 'P' வகைக் குறைகடத்தியில் வெளியிலிருந்து உட்செலுத்தப்பட்ட கூடுதல் எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கையைக் காட்டுகிறது. 'n_p' என்பது எலெக்ட்ரானின் சமநிலை அடர்த்தி மதிப்பாகும். 'τ_n' என்பது 'P' வகைக் குறைகடத்தியில் எலெக்ட்ரானின் வாழ்வு நேரமாகும்.

$$\frac{dn}{dt} = \frac{(n_p - n)}{\tau_n} + \frac{1}{e}\frac{dJ_n}{dx}$$

மேலே கண்ட சமன்பாடு 'P' வகைக் குறைகடத்தியில் உள்ள எலெக்ட்ரானின் தொடர்ச்சிச் சமன்பாடு (ஒற்றைப் பரிமாணத்தில்) ஆகும்.

அதேபோல் N வகைக் குறைகடத்தியில் உள்ள துளைகளின் தொடர்ச்சிச் சமன்பாட்டை

$$\frac{dp}{dt} = \frac{(p_n - p)}{\tau_p} - \frac{1}{e}\frac{dJ_p}{dx}$$

என்று ஒற்றைப் பரிமாணத்திற் காணலாம்.

9.22 நேர்ப்பட்டை இடைவெளி (Direct band gap), அயற்பட்டை இடைவெளி (Indirect band gap) குறைகடத்திகள்

பட்டைக் கருத்தியலின் (band theory)படி, கடத்துப் பட்டையிலுள்ள எலெக்ட்ரான் பெயர்வு அடைந்து இணை திறப்பட்டையிலுள்ள துளையுடன் எங்ஙனம் ஒன்றிடுகிறது என்பதிலிருந்து குறைகடத்திகளை இரு வகைகளாகப் பிரிக்கலாம். அவற்றை **நேர்ப்பட்டை இடைவெளிக்குறைகடத்தி** (direct band gap semiconductor), **அயற்பட்டைஇடைவெளிக் குறைகடத்தி** (indirect band gap semiconductor) என்று கூறுவர். அவற்றிற்கு இடையே காணும் வேறுபாடுகளைப் பின்வருமாறு கூறலாம்.

	நேர்ப்பட்டை இடைவெளிக் குறைகடத்தி	அயற்பட்டை இடைவெளிக் குறைகடத்தி
1.	இங்குப் பெயர்வின்போது கடத்துப் பட்டையிலுள்ள கட்டற்ற எலெக்ட்ரான் நேர்வழியில் வந்து இணைதிறப்பட்டையிலுள்ள துளையுடன் ஒன்றிவிடுகிறது.	இங்குப் பெயர்வின்போது கடத்துப் பட்டையிலுள்ள கட்டற்ற எலெக்ட்ரான் பட்டை இடைவெளியிலுள்ள கண்ணிகள் போன்றவற்றால் சிறிது நேரம் பிடித்துவைக்கப்பட்டுப் பின் விடுதலையாகி, இணைதிறப்பட்டையிலுள்ள துளையுடன் ஒன்றிவிடுகிறது.

	நேர்ப்பட்டை இடைவெளிக் குறைகடத்தி	அயற்பட்டை இடைவெளிக் குறைகடத்தி
2.	இதில் கடத்துப் பட்டையின் சிறும ஆற்றல் மட்டமும், இணை திறப்பட்டையின் பெரும ஆற்றல் மட்டமும் k- வெளியில் (k-space) ஒரே புள்ளியில் அமையும்	இதில் கடத்துப் பட்டையின் சிறும ஆற்றல் மட்டமும், இணைதிறப் பட்டையின் பெரும ஆற்றல் மட்டமும் k- வெளியில் வெவ்வேறு புள்ளிகளில் அமைந்திருக்கின்றன.
3.	எலெக்ட்ரானும், துளையும் ஒன்றிடும்போது, போட்டான் ஒன்று வெளியிடப்படுகிறது.	எலெக்ட்ரான், துளையோடு ஒன்றிடும் போது போனான்கள் (phonons) வெளிவிடப்படுகின்றன.
4.	போட்டான்கள் வெளிவிடப்படுவதால் இவை ஒளிஉமிழ் டையோடுகள் (light emitting diodes), லேசர் டையோடுகள் (laser diodes) செய்யப் பயன்படுகின்றன.	போனான்கள் வெளிவிடப்படுவதால் படிக அணிக்கோவையின் அதிர்வு ஆற்றல் கூடி, படிகத்தின் வெப்பநிலை அதிகரிக்கிறது.
5.	மின்னூட்டக் கடத்திகளின் வாழ்வு நேரம் மிகக் குறைவு.	மின்னூட்டக் கடத்திகளின் வாழ்வு நேரம் மிக அதிகம். எனவே இவை டிரான்சிஸ்டர்கள், அலைதிருத்தி டையோடுகள் (rectifier diodes) செய்யப்பயன்படுகின்றன.
6.	டிரான்சிஸ்டர்களுக்கு மின்னோட்ட பெருக்குத்திறன் மிகமிகக் குறைவு. **உதாரணங்கள்** : காலியம் ஆர்சனைடு (Ga As), இண்டியம் பாஸ்பைடு (InP).	டிரான்சிஸ்டர்களுக்கு மின்னோட்ட பெருக்குத்திறன் மிக அதிகம். **உதாரணங்கள்** : ஜெர்மேனியம், சிலிக்கான்

மாதிரிக் கணக்குகள் :

(1) தாமிரத்தின் ஒவ்வோர் அணுவும் ஒரு கட்டற்ற எலெக்ட்ரானை அளிப்பதாய் வைத்துக்கொண்டு, அதில் எலெக்ட்ரானின் நகர்வு திறனைக் கண்டுபிடி.

தாமிரத்தின் மின்எதிர்ப்புத்திறன் = 1.7×10^{-8} ஓம் மீட்டர்; அணுஎடை = 63.54;

அடர்த்தி = 8960 கிலோகிராம்/மீ^{3}; அவகட்ரோஎண் = 6.025×10^{26}/கிலோமோல்

எலெக்ட்ரான் மின்னூட்டத்தின் மதிப்பு = 1.6×10^{-19} கூலம்

ஓரலகு பருமன் தாமிரத்திலுள்ள கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை 'n'

$$= \frac{\text{அவகட்ரோ எண்} \times \text{அடர்த்தி} \times \text{கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்கள்/அணு}}{\text{அணு எடை}}$$

$$= \frac{6.025 \times 10^{26} \times 8.96 \times 10^{3} \times 1}{63.54} = 8.496 \times 10^{28} \,/\, \text{மீ}^3$$

எலெக்ட்ரான்களின் நகர்வு திறன் 'μ_n' $= \frac{\sigma}{ne} = \frac{1}{\rho ne}$

$$= \frac{1}{1.7 \times 10^{-8} \times 8.496 \times 10^{28} \times 1.6 \times 10^{-19}} = 43.27 \times 10^{-4}$$ மீ^{2}/வோல்ட்-செகண்டு.

(2) 2 செ.மீ. அகலமும், 1 மில்லி மீட்டர் தடிமனும் உள்ள ஒருதாமிரத்தண்டு ஒருவெளிக்காந்தப் புலத்தில் கிடத்தப்படுகிறது. வெளிக்காந்தப் புலத்தின் காந்தத் தூண்டல் 'B' = 1.5 வெபர்/மீ^{2}. தண்டின்வழியே 200 ஆம்பியர் மின்னோட்டம் சென்றால், அதில் தோன்றும் ஹால் மின்னழுத்த மதிப்பென்ன? மேலும், ஹால் நகர்வு திறனையும் கணக்கிடுக. தாமிரத்தின் $R_H = -0.55 \times 10^{-10}$ $\frac{\text{வோல்ட்டு} - \text{மீ}^3}{\text{ஆம்பியர்–வெபர்}}$

$$\text{ஹால் மின்புலம் } E_H = \frac{JB}{ne} = \frac{\text{ஹால் மின்னழுத்தம் } 'V_H'}{\text{தண்டின் தடிமன்}}$$

$$\text{மேலும், } J = \frac{i}{A} = \frac{i}{dh}$$

இங்கு i = மின்னோட்டம் ; d, h முறையே தண்டின் அகலமும், உயரமும் ஆகும்.

$$\therefore V_H = \frac{iB}{neh}$$

முதல் கணக்கின்படி தாமிரத்திலுள்ள கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை $n = 8.496 \times 10^{28}/$ மீ^{3} எனக் கணக்கிட்டோம். அதனை இங்குப் பயன்படுத்த

$$V_H = \frac{200 \times 1.5}{8.496 \times 10^{28} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1 \times 10^{-3}}$$

$= 2.2 \times 10^{-5}$ வோல்ட்டு = 22 மைக்ரோ வோல்ட்டு

ஹால் நகர்வு திறன் $\mu_H = \frac{R_H}{\rho} = \frac{0.55 \times 10^{-10}}{1.7 \times 10^{-8}} = 0.0032$ மீ^{2}/வோல்ட்டு-செகண்டு.

(3) 310 கெல்வின் வெப்பநிலையில் உள்ள ஒருதூய சிலிக்கான் படிகத்தின் ஓரலகு பருமனில் இருக்கும் எலெக்ட்ரான்-துளை இரட்டைகளின் எண்ணிக்கையைக் கணக்கிடுக. மேலும் சிலிக்கானின் ஆற்றல் இடைவெளி = 1.12 எலெக்ட்ரான் வோல்ட், ஒருதூய ஜெர்மேனிய படிகத்தில் 300 கெல்வின் வெப்பநிலையில் ஓரலகு பருமனில் உள்ள எலெக்ட்ரான்-துளை இரட்டைகளின் எண்ணிக்கை 2.5×10^{19} ஆகும். போல்ட்ஸ்மேன் மாறிலி $= 1.38 \times 10^{-23}$ ஜூல்/கெல்வின். ஜெர்மேனியத்தின் ஆற்றல் இடைவெளி = 0.72 எலெக்ட்ரான்வோல்ட்டு.

ஒரு தூய குறைகடத்தியில் எலெக்ட்ரான்-துளை இரட்டையின் அடர்த்தி,

$$n_i = 2\left(\frac{2\pi kT}{h^2}\right)^{3/2} (m_h^* m_e^*)^{3/4} \exp(-E_g/2kT)$$

இதனையே வேறுவிதமாகவும் எழுதலாம்.

$$n_i = A\, T^{3/2} \exp(-E_g/2kT)$$

E_g ன் மதிப்பு எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டில் கொடுக்கப்பட்டு இருந்தால் அதனை ஜூல்களில் மாற்ற எலெக்ட்ரான் மின்னூட்ட மதிப்பால் அதனைப் பெருக்கவேண்டும். ஜெர்மேனியத்திற்கு, $n_i = 2.5 \times 10^{19}/$ மீ^{3} எனக் கொடுக்கப்பட்டுள்ளது. அஃதாவது,

$$2.5 \times 10^{19} = A(300)^{3/2} \exp\left[\frac{-1.6 \times 10^{-19} \times 0.72}{2 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 300}\right]$$

$$= A(300)^{3/2} \exp\left[\frac{-11600 \times 0.72}{2 \times 300}\right] \qquad (1)$$

சிலிக்கானில் $n_i = A(310)^{3/2} \exp\left[\frac{-11600 \times 1.12}{2 \times 310}\right]$ (2)

சமன்பாடு (2) ஐ சமன்பாடு (1) ஆல் வகுக்க நமக்குக் கிடைப்பது,

$$\frac{n_i}{2.5 \times 10^{19}} = \left[\frac{310}{300}\right]^{3/2} \frac{\exp\left[\frac{-11600 \times 1.12}{620}\right]}{\exp\left[\frac{-11600 \times 0.72}{600}\right]}$$

$$\therefore n_i = 2.5 \times 10^{19} \times (1.033)^{3/2} \exp\left[-\frac{11600 \times 1.12}{620} + \frac{11600 \times 0.72}{600}\right]$$

$$= 2.31 \times 10^{16}/\ \text{மீ}^3$$

(4) கீழ்க்குறிப்பிடப்பட்ட அளவுகளைப் பயன்படுத்தி இயல்பாய ஜெர்மேனியத்தின் மின்னூட்டக் கடத்திகளின் அடர்த்தியையும், மின்கடத்துந்திறனையும், மின் எதிர்ப்புத் திறனையும் 300 கெல்வின் வெப்ப நிலையில் கணக்கிடுக. 10^5 ஜெர்மேனிய அணுக்களுக்கு ஒருபோரான்அணு வீதம் கலக்கப்பட்டால், அதன் புதிய மின்கடத்துந்திறனையும், மின் எதிர்ப்புத் திறனையும் கணக்கிடுக.

ஜெர்மேனியத்தின் அணுஎடை	=	72.6; அடர்த்தி = 5400 கிலோ கிராம்/மீ^{3}
ஆற்றல் இடைவெளி	=	0.7 எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு
எலெக்ட்ரானின் நகர்வுதிறன்	=	0.4 மீ^{2} /வோல்ட்டு - செகண்டு
துளையின் நகர்வு திறன்	=	0.2 மீ^{2} /வோல்ட்டு - செகண்டு

எலெக்ட்ரான்டு மின்னூட்டம்	=	1.6×10^{-19} கூலம்
எலெக்ட்ரான் நிறை	=	9.108×10^{-31} கிலோ கிராம்
போல்ட்ஸ்மேன் மாறிலி	=	1.38×10^{-23} ஜூல்/கெல்வின்
பிளாங்க் மாறிலி	=	6.625×10^{-34} ஜூல் செகண்டு

$$n_i = 2\left(\frac{2\pi\, m\, kT}{h^2}\right)^{3/2} \exp\,(-E_g/2kT)$$

$$= 2\left(\frac{2 \times \pi \times 9.108 \times 10^{-31} \times 1.38 \times 10^{-23} \times 300}{(6.625 \times 10^{-34})^2}\right)^{3/2} \exp\left(\frac{-1.6 \times 10^{-19} \times 0.7}{2 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 300}\right)$$

$$= 3.35 \times 10^{19}/\text{மீ}^3$$

மின்கடத்துந்திறன், $\sigma = n_i\, e\,(\mu_e + \mu_h) = 3.35 \times 10^{19} \times 1.6 \times 10^{-19}\,(0.4 + 0.2)$

$$= 3.216 \text{ ஓம்}^{-1} \text{ மீ}^{-1}$$

மின்எதிர்ப்புத்திறன் $\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{3.216} = 0.311$ ஓம் மீட்டர்.

ஓரலகு பருமன் உள்ள ஜெர்மேனியத்திலுள்ள மொத்த அணுக்கள்

$$= \frac{6.025 \times 10^{26} \times 5400}{72.6} = 4.5 \times 10^{28}/\text{மீ}^3$$

ஜெர்மேனியத்தில் போரான் அடர்த்தி $= \frac{4.5 \times 10^{28}}{10^5} = 4.5 \times 10^{23}$ அணுக்கள்/ மீ^{3}

இதுவே துளைகளின் அடர்த்தியாகும்.

$\therefore$ எலெக்ட்ரான்களின் அடர்த்தி $= \frac{n_i^2}{p} = \frac{(3.35 \times 10^{19})^2}{4.5 \times 10^{23}}$

$$\approx 2.5 \times 10^{15}/\text{மீ}^3$$

அதனால், துளைகளின் அடர்த்தி ஏறத்தாழ 10^8 மடங்கு எலெக்ட்ரான்களின் அடர்த்தியை விட அதிகமாயிருப்பதால் மின்கடத்துந்திறன் கணக்கிடும்போது அதில் எலெக்ட்ரான் பங்கினை நீக்கிவிடலாம்.

$\therefore\ \sigma = p\, e\, \mu_h$

$$= 4.5 \times 10^{23} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 0.2 = 1.44 \times 10^4 \text{ ஓம்}^{-1} \text{ மீட்டர்}^{-1}$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{1.44 \times 10^4} = 0.694 \times 10^{-4} \text{ ஓம்–மீ}$$

அதனால், போரான் அணுக்களைச் சேர்த்தவுடன் ஜெர்மேனியம் 'P' வகைக் குறைகடத்தியாவதுடன் அதன் மின்கடத்துந்திறனும் 10^4 மடங்கு கூடுகிறது.

(5) ஒருதூய குறைகடத்தியின் மின்னூட்டக் கடத்திகளின் செறிவு $n_i = AT^{3/2} \exp(-E_g/2kT)$ என்றால், அதில் $A = 4.8 \times 10^{21}$ ஆகும். மேலும் பட்டை இடைவெளி, $E_g = 0.67$ எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு. அறைவெப்பநிலை $T = 300$ கெல்வினில் $kT = 0.025$ எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு. இதில் கொடையணுக்களை 10^{22} அணுக்கள்/மீ^{3} என்ற செறிவில் கலந்து N வகைக் குறைகடத்தியாய் அதை உருவாக்கும் போதும், தூயகுறைகடத்தியாய் இருந்த போதும் 'np' பெருக்கற்பலன் மதிப்பு மாறாது என்ற நிறைசெயல் விதி சரியானதே என்பதனைக் காட்டு.

தூய குறைகடத்தியாய் இருக்கும் போது,

$$n_i = (np)^{1/2} = AT^{3/2} \exp(-E_g/2kT)$$

$$= 4.8 \times 10^{21} \times 300^{3/2} \times \exp(-0.67/0.05)$$

$$= 3.78 \times 10^{19}$$

$$\therefore np = 1.43 \times 10^{39} \quad (1)$$

N-வகைக் குறைகடத்தியாய் மாறும் போது, மிகக் குறைந்த வெப்பநிலைகளில் கடத்துப்பட்டையிலுள்ள எலெக்ட்ரான்கள் அனைத்தும் கொடையணுக்களால் வந்ததொன்றாகும்.

$$\therefore n = A\,T^{3/2} \exp\left[\frac{E_f - E_c}{kT}\right] = N_d$$

எனவே $n \approx N_d = 10^{22}$/மீ^{3}. இதை n_d எனவை.

மேலும் $$\exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right) = \frac{10^{22}}{4.8 \times 10^{21} \times 300^{3/2}}$$

(அல்லது) $$\exp\left(\frac{E_c - E_f}{kT}\right) = 4.8 \times 10^{21} \times 300^{3/2}/10^{22} = 2494$$

$$\therefore \frac{E_c - E_f}{kT} = \log 2494 = 7.822$$

(அல்லது) $E_c - E_f = 7.822 \times 0.025 = 0.1955$ எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு.

மேலும் $E_g = E_c - E_v = 0.67$ எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு என்பதால் $E_f - E_v = 0.67 - 0.1955 = 0.4745$ எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு ஆகும். வெப்பநிலை

அதிகரிக்க, கடத்துப்பட்டைக்கு இணைதிறப்பட்டையிலிருந்தும் எலெக்ட்ரான்கள் வரும். குறிப்பாக இணைதிறப்பட்டையிலிருந்து வரும் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களின் செறிவு n_V, இணைதிறப்பட்டையில் உள்ள துளைகளின் செறிவுக்குச் சமமாகும்.

$$n_v = p = AT^{3/2} \exp\left((E_v - E_f)/kT \right)$$

$$= 4.8 \times 10^{21} \times 300^{3/2} \exp(-0.4745/0.025)$$

$$= 1.43 \times 10^{17}/\text{மீ}^3$$

இணைதிறப்பட்டையிலிருந்து வரும் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களின் செறிவும் n_v, கொடையணுக்கள் மூலம் வரும் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களின்செறிவும் n_d சேர்ந்தே எலெக்ட்ரான் செறிவாகும். அஃதாவது, $n_v + n_d = n$

$$\therefore np = (10^{22} + 1.43 \times 10^{17})(1.43 \times 10^{17}) = 1.43 \times 10^{39} \quad (2)$$

சமன்பாடு (1)ம், (2)ம் சமமாய் இருப்பதால் நிறைசெயல் விதி சரியானது ஆகும்.

சுருக்கம்

1. குறைகடத்தியின் மின்கடத்துந்திறன் கடத்திகளுக்கும் கடத்தாப் பொருள்களுக்கும் இடையில் உள்ளது. மூன்று இணைதிற அல்லது ஐந்துஇணைதிறத் தனிம அணுக்களை ஜெர்மேனியம், சிலிக்கான் ஆகியவற்றில் சேர்ப்பதால் அவற்றின் மின் கடத்துந்திறன் மிகுதியாய்க் கூடுகிறது.
2. குறைகடத்தியில் மூன்று இணைதிற ஏற்பு அணுக்களைச் சேர்க்கும்போது அது 'P' வகைக் குறைகடத்தியாயும், அதே சமயத்தில் ஐந்துஇணைதிறக் கொடை அணுக்களைச் சேர்க்கும்போது அது 'N' வகைக் குறைகடத்தியாயும் செயல்படுகிறது.
3. குறைகடத்தியின் மின்கடத்துந்திறன் அதில் உள்ள மின்னூட்டக் கடத்திகளின் மொத்த எண்ணிக்கையையும், அவற்றின் நகர்வு திறனையும் சார்ந்துள்ளது. மின்னூட்டக் கடத்திகளின் மொத்த எண்ணிக்கை வெப்பநிலையையும், வேற்று அணுக்கள் கலந்துள்ள விகிதத்தையும் சார்ந்துள்ளது.
4. தனிம நிலையில் உள்ள குறைகடத்திகளில் சிலிக்கான்மட்டுமே மிக அதிகமாகக் குறைகடத்திக் கருவிகளில் பயன்படுகிறது.
5. ஃபெர்மி ஆற்றல்மட்டம் இயல்பாய குறைகடத்தியில் ஆற்றல் இடைவெளியின் நடுவில் உள்ளது. 'N' வகைக் குறைகடத்தியில் அது கடத்துப் பட்டையை நோக்கி இடம்பெயர்ந்தும். 'P' வகைக் குறைகடத்தியில் இணைதிறப் பட்டையை நோக்கி இடம்பெயர்ந்தும் உள்ளது.
6. அதிக வெப்பநிலைகளில் வேற்றுப்பொருள் கலந்த குறைகடத்தி இயல்பாய குறைகடத்திபோலவே செயல்படுகிறது.

7. ஒருவெளிக்காந்தப்புலத்தில் உள்ள மின்கடத்தியில் மின்னோட்டம் காந்தப் புலத்திற்குச் செங்குத்தாய்ச் செல்லும்போது, ஒருமின்புலம் மின்னோட்டத்திசை, காந்தப்புலத்திசை ஆகியவற்றிற்குச் செங்குத்தாய்த் தோன்றுகிறது. இதுவே ஹால் விளைவு ஆகும். இதன்மூலம் மின்னூட்டக் கடத்திகள் ஒருபொருளில் நேர்க்குறி உடையனவா அல்லது எதிர்க்குறி உடையனவா என்று கண்டுபிடிக்கலாம்.
8. குறைகடத்திகளில் வேற்றுப்பொருள்களின் அணுக்களைச் சேர்த்தாலும் அவற்றில் உள்ள மின்னூட்டங்களின் நடுநிலைமை பாதுகாக்கப்படுகிறது.
9. மின்னூட்டக் கடத்திகளின் வாழ்வு நேரத்தைக் கண்ணிகளும், ஒன்றிடும் மையங்களும் மிகுதியாய்ப் பாதிக்கின்றன. ஒருதுளையும், ஓர்எலெக்ட்ரானும் ஒன்றிடும்போது ஒருகவள ஆற்றல் வெளிப்படுகிறது.
10. தொடர்ச்சிச் சமன்பாடுமூலம் மின்னூட்டக் கடத்திகள் மிகுதியாகும் வீதத்தைக் கணக்கிடலாம்.
11. நேர்ப் பட்டை இடைவெளிக் குறைகடத்திகள் லேசர், ஒளிஉமிழ்டையோடுகள் உற்பத்தி செய்யவும், அயற்பட்டை இடைவெளிக் குறைகடத்திகள் டிரான்சிஸ்டர்கள், அலைதிருத்தி டையோடுகள் உற்பத்தி செய்யவும் பயன்படுகின்றன.

வினாக்கள்

1. குறைகடத்திகளில் இயல்பாய மின்கடத்தல் எவ்வாறு நடைபெறுகிறது என்பதனை விளக்கு. மேலும், இயல்பாய குறைகடத்திகளில் மின்கடத்துந்திறன் காண உதவும் கோவையை மின்னூட்டக் கடத்திகளின் செறிவிலும், நகர்வு திறன்களிலும் எழுது.
2. இயல்பாய, வேற்றுப் பொருள் கலந்த குறைகடத்திகளில் மின்கடத்துந்திறன் எவ்வாறு வெப்பநிலைவேறுபாட்டால் மாறுகிறது என்பதனை வரைபடம் வரைந்து காட்டுக. அவ்வரைபடங்களின் சாய்வுகள் மூலம் என்ன கூறுவாய்? குறைகடத்திகளின் மின்கடத்துந்திறனைக் கண்டுபிடிக்க உதவும் ஒரு பரிசோதனையை விளக்குக.
3. 'P' வகை, 'N' வகைக் குறைகடத்திகளில் அதிகமான, குறைவான வேற்றுப்பொருள் கலக்கும்போது ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டம் வெப்பநிலை மாறுபாடுகளால் எவ்வாறு மாறுகிறது என்பதனைப் படம் வரைந்து காட்டுக. ஆற்றல் இடைவெளி காண உதவும் ஒருபரிசோதனையை விவரி.
4. 'P' வகைக் குறைகடத்தி என்றால் என்ன ஏற்பு அணுக்கள் என்றால் என்ன? கடத்துப் பட்டைக்குப் பாஸ்பர அணுக்கள் எவ்வ எலெக்ட்ரான்களைக் கொடையாயளிக்கிறது என்பதனை விளக்கு.
5. வேற்றுப்பொருள் கலந்த குறைகடத்திகளில் எங்கே கொடையணு ஆற்றல் மட்டமும், ஏற்பு அணு ஆற்றல் மட்டமும் உள்ளன? ஏன்?
6. இயல்பாய குறைகடத்தியில் உள்ள மின்னூட்டக் கடத்திகளின் செறிவைக் காணப் பயன்படும் கோவையைத் தருவி.

ஜெர்மேனியத்தின் ஆற்றல் இடைவெளி 0.71 எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு, 30 டிகிரி செண்டிகிரேடில் அதிலுள்ள எலெக்ட்ரான்-துளை இரட்டைகளின் எண்ணிக்கை 2.54×10^{19}/ மீ^{3}. சிலிக்கானின் ஆற்றல் இடைவெளி 1.14 எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு, சிலிக்கானில் 40 டிகிரி செண்டிகிரேடில் உள்ள எலெக்ட்ரான்-துளை இரட்டைகளின் எண்ணிக்கையைக் கண்டுபிடி. போல்ட்ஸ்மேன் மாறிலி 'k' $= 1.38 \times 10^{-23}$ ஜூல்/கெல்வின் (1.36×10^{16}/மீ^{3})

7. ஜெர்மேனியத்தில் அலுமினிய அணுக்கள் சேர்க்கப்படுகின்றன. கலக்கப்பட்ட அலுமினிய அணுக்களின் அடர்த்தி, 2×10^{21} அணுக்கள்/மீ^{3} ஆகும். 300 கெல்வினில் துளையின் அடர்த்தியையும், கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களின் அடர்த்தியையும் மின்கடத்துந் திறனையும் கண்டுபிடி. துளையின் நகர்வுதிறன் $\mu_p = 0.17$ மீ^{2}/வோல்ட்டு-செகண்டு. ($p = 2 \times 10^{21}$/மீ^{3}, $n = 5.6 \times 10^{17}$/மீ^{3}, $\sigma = 54.4$ ஓம்$^{-1}$ மீ$^{-1}$)

8. சிறுபான்மை மின்னூட்டக் கடத்திகள் என்றால் என்ன? அவற்றை எவ்வாறு செயற்கை முறையில் தோற்றுவிக்கலாம்? அவற்றின் வாழ்வு நேரத்தைக் கணக்கிட உதவும் பரிசோதனை ஒன்றனை விவரி.

9. நகர்வுதிறன் என்றால் என்ன? ஹால் விளைவினை விவரித்து ஹால் குணகம் கணக்கிட உதவும் கோவையைத் தருவி.

10. ஹால் குணகம், பரிசோதனைக் கூடத்தில் எவ்வாறு கண்டுபிடிக்கப்படுகிறது?

11. கண்ணிகள், ஒன்றிடும் மையங்கள் என்றால் என்ன? அவை எங்ஙனம் மின்னூட்டக் கடத்திகளின் வாழ்வு நேரத்தை மாற்றுகின்றன?

12. நிறைசெயல்விதி என்றால் என்ன? அதன் பயன்யாது? தொடர்ச்சிச் சமன்பாட்டை எழுதி, அதனை இயற்பியல்முறையில் விளக்குக.

13. நேர்ப்பட்டை இடைவெளி, அயறப்பட்டை இடைவெளிக் குறைகடத்திகள் பற்றி ஒருகுறிப்பு வரைக.

மேற்கோள் நூற்பட்டியல் :

1. 'Materials Science' – J.C. Anderson, K.D. Leaver, R.D. Rawlings and J.M. Alexander, Chapman and Hall, London, 1990.

2. 'Materials Science and Engineering' – V. Raghavan, Prentice – Hall of India Private Ltd, New Delhi, Fourth Edition, 1990.

3 'Properties of Electrical Engineering Materials' – G.C. Jain, Harper and Row, New York, 1967.

10. குறைகடத்திக் கருவிகளின் கருத்தியல்

10.1. அறிமுகம்

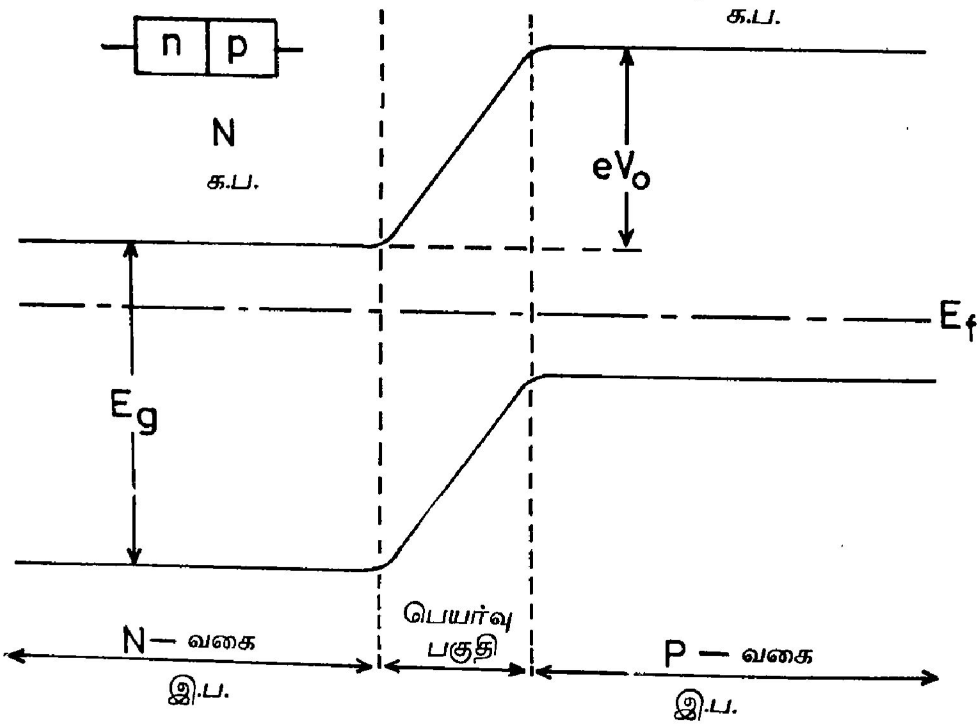
சென்ற அத்தியாயத்தில் குறைகடத்திகளின் இயற்பியல் பண்புகளைக் கண்டோம். இவ்வத்தியாயத்தில் அக்குறைகடத்திகளை மூலப்பொருள்களாய்க் கொண்டுள்ள சில கருவிகளின் இயக்க முறைகளைப் பற்றிக் காணப்போகிறோம். இப்பகுதியில் அலைதிருத்தி டையோடு, புழல் டையோடு போன்ற பலவகை டையோடுகளையும், பலவகை டிரான்சிஸ்டர்களையும் அவை வேலை செய்யும் விதத்தையும், இறுதியில் உலோகக் குறைகடத்திச்சந்தியின் முக்கியத்துவத்தையும், டையோடுகள், டிரான்சிஸ்டர்கள் உற்பத்தி செய்யும் முறைகளையும் காணப்போகிறோம்.

10.2. P-N சந்திக் கருத்தியல் (theory)

ஒரு 'P' வகைக் குறைகடத்தி, மற்றொரு 'N' வகைக் குறைகடத்தியுடன் தொடர்ச்சியாய் ஒன்றனையொன்று தொட்டுக் கொண்டு இருக்குமாறு செய்யப்பட்டால் ஒரு P-N சந்தி உருவாகிறது. ஆனால், நடைமுறையில் ஒரு 'P' வகைப் பொருளையும் 'N' வகைப் பொருளையும் ஒன்றனையொன்று தொடுமாறு பொருத்தி, ஒரு P- N சந்தியை உருவாக்க முடியாது. ஏனெனில், இவ்வாறு உருவாக்கப்படும் சந்தியில் அணிக்கோவை அமைப்புத் தொடர்பற்று இருக்கும். அதனால், மின்னூட்டக் கடத்திகள் பொருளின் ஒருபகுதியிலிருந்து அடுத்த பகுதிக்குச் செல்லமுடியாது. பொதுவாய், ஒருகுறைகடத்திப் படிகம் வளர்க்கும் பொழுது ஒருகுறிப்பிட்ட நேர இடைவெளிகளில் தேவையான அளவு கொடையணுக்களையும், பின் ஏற்புஅணுக்களையும் கலந்து கொண்டுவந்தால் குறைகடத்திப் படிகத்தில் 'N' வகைப்பகுதிகளும், 'P' வகைப் பகுதிகளும் அடுத்தடுத்து வரிசையாய்க் குறிப்பிட்ட அளவு பருமனில் வளர்ந்திருக்கும். இதனை மிகச்சிறு P-N சந்திடையோடுகளாக வெட்டி எடுத்துக்கொள்ளலாம். இவ்வாறு தயாரிக்கப்பட்ட டையோடுகளில் 'P' பகுதியும் 'N' பகுதியும் சந்திக்கும் இடத்தில் அல்லது சந்தியில் அணிக்கோவை தொடர்ச்சியாயிருக்கும். அதனால் எதிர்க்குணங்கள் கொண்ட 'P' பகுதி, 'N' பகுதி ஆகிய இருபகுதிகளைப் பிரிக்கும் எல்லையை நாம் P-N சந்தி எனக் கூறுகிறோம்.

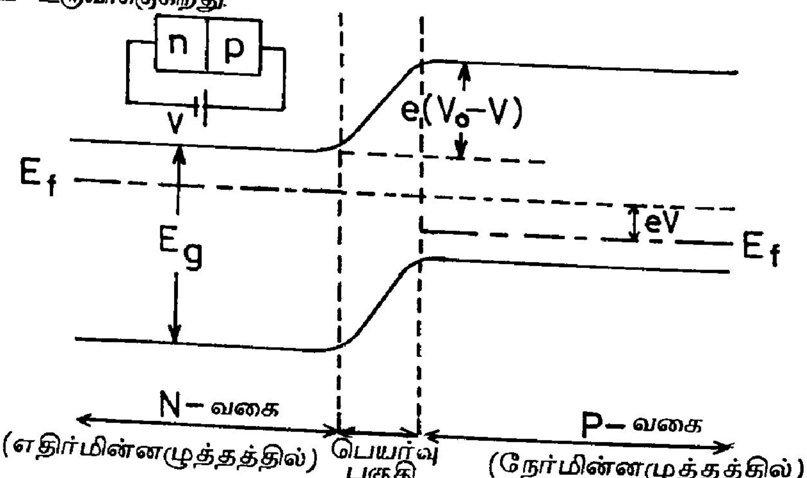
P- N சந்தி டையோடுகளை அலை திருத்தியாயும் (rectifier), பகுப்பானாயும் (detector), கலப்பானாயும் (mixer) பயன்படுத்துகிறோம். P- N சந்திகள் பல்வேறு செயல்முறைகளில் தயாரிக்கப்படுகின்றன. பெரும்பாலும் தயாரிக்கும் முறைகளை ஒட்டியே அவைகளுக்கு வளர்க்கப்பட்ட சந்தி (grown junction), புள்ளி தொடுசந்தி (point contact junction), விரவலால் உருவாக்கப்பட்ட சந்தி (diffusion grown junction), உருக்கி ஒட்டிய சந்தி (melt grown junction) என்று பெயரிடப்பட்டுள்ளன.

P-N சந்தி ஆற்றல் மட்டங்கள்

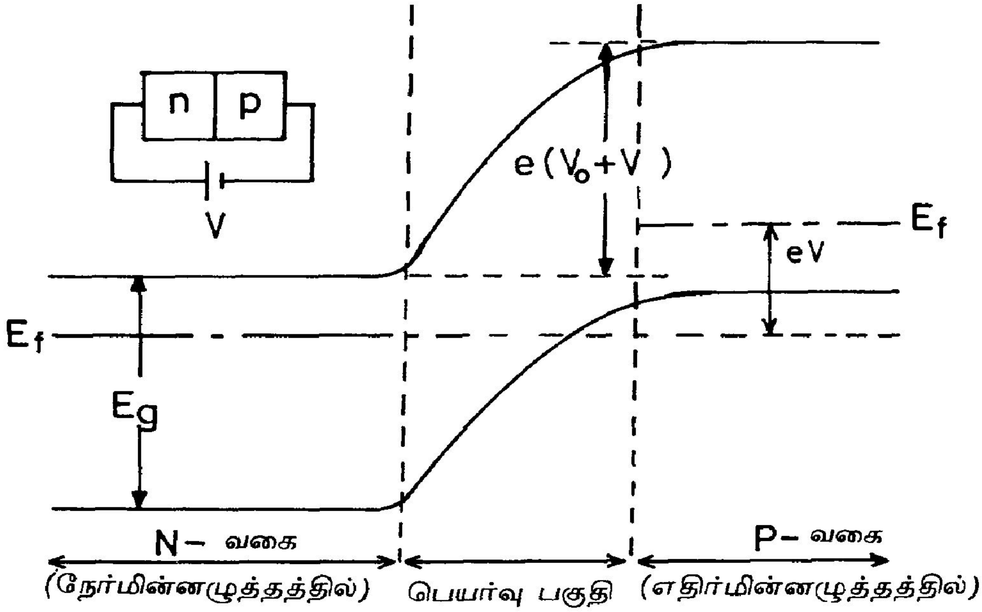


க.ப. – கடத்துப் பட்டை; இ.ப – இணைதிறப் பட்டை

படம் **10.1** (அ): சார்பு மின்னழுத்தம் (bias voltage) ஏதும் இல்லாதபோது ஃபெர்மி மட்டம் 'E_f', P-N சந்தியின் இருபக்கங்களிலும் ஒருமாறிலியாயுள்ளது ; தொடு மின்னழுத்தம் சந்தியில் eV_0 எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு உள்ள ஒரு தடுப்பு மேட்டை உருவாக்குகிறது.



படம் **10.1** (ஆ): முன்னோக்கிய சார்புமின்னழுத்தம் 'V' வோல்ட்டால் தொடுமின்னழுத்தம் $e(V_0 - V)$ எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டாக மாறுகிறது. அதனால், தடுப்பு மேட்டின் உயரம் அதற்குத் தகுந்தாற் போல் குறைகிறது.



படம் 10.1 (இ): திருப்பிய சார்பு மின்னழுத்தத்தில் தொடுமின்னழுத்தம் $e(V_0 + V)$ எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டாக மாறுகிறது. அதனால் தடுப்பு மேட்டின் உயரமும் அதற்கேற்றாற் போல் கூடுகிறது.

10.2.1 P-N சந்தி டையோடின் அலை திருத்தும் தன்மை

ஒரு தூய குறைகடத்திப் படிகத்தை 'P' வகைக் குறைகடத்தியாய் மாற்றும்பொழுது ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டம் ஆற்றல் இடைவெளியின் மையத்திலிருந்து கீழ்நோக்கி ஏற்பு அணு ஆற்றல் மட்டத்தை நோக்கி இடம்பெயர்கிறது. ஆனால், அதே படிகம் அதன் ஒருபக்கத்தில் 'P' வகையாயும் மற்றொரு பக்கத்தில் 'N' வகையாயும் இருக்குமாறு வேற்றுஅணுக்கள் கலந்திருந்தால், ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டம் வெப்பச் சமநிலையில் அப்படிகம் முழுதும் படம் 10.1 (அ) வில் காட்டியவாறு ஒருமாறிலியாயிருக்கும். அஃதாவது, 'N' பகுதியின் கடத்துப் பட்டையின் அடிமட்டத்தில் உள்ள எலெக்ட்ரான் ஆற்றல் மட்டங்கள் எல்லாம் 'P' பகுதியின் கடத்துப் பட்டையின் அடிமட்டத்தில் உள்ள எலெக்ட்ரான் ஆற்றல் மட்டங்களைவிடத் **தொடு மின்னழுத்தம்** (contact potential) அல்லது **தடுப்பு மின்னழுத்தம்** (barrier potential) அளவு கீழே இருக்கும். சமநிலையில் P-N சந்தியில் மின்னோட்டம் ஏதும் இராது. 'P' பகுதியின் கடத்துப் பட்டையிலுள்ள எலெக்ட்ரான் செறிவு மிகக்குறைவாயிருந்தாலும், அவை P- N சந்தியின் மின்னழுத்தமேட்டின் வழியே 'N' பகுதிக்கு முடுக்கப்படுகின்றன. அதனால், ஒருமின்னோட்டம் கிடைக்கிறது. இது 'P' பகுதியிலிருந்து 'N' பகுதிக்குச் சென்ற எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கையைப் பொருத்தது. அதேபோல் 'N' பகுதியின் இணைதிறன்பட்டையிலிருந்து 'P' பகுதியின் இணைதிறன்பட்டைக்கு துளைகள் முடுக்கப்படுகின்றன. இதன் காரணமாகவும் ஒரு மின்னோட்டம் கிடைக்கிறது. மேற்கண்ட இருமின்னோட்டங்களும் சிறுபான்மை (minority) மின்னூட்டக் கடத்திகளால் வருவனவாகும். அவ்விருமின்னோட்டங்களின் மொத்த மதிப்பு I_0 ஆகும். இதனைத் **திருப்பிய மின்னோட்டம்** (reverse current) என்பர்.

மேலும் 'N' பகுதி கடத்துப் பட்டையிலுள்ள எலெக்ட்ரான்களின் செறிவு கொடையணுக்களால் மிக அதிகமாயிருக்கும். விரவல் முறையில் இவ்வெலெக்ட்ரான்கள் தடுப்பு மேட்டில் ஏறி 'P' பகுதியின் கடத்துப்பட்டைக்கு வருகின்றன. இதே போல் விரவல் முறையில் 'P' பகுதியில் உள்ள துளைகள் 'N' பகுதிக்கு வருகின்றன. இவ்விரவல் முறையால் வரும் மின்னோட்டங்களை **முன்னோக்கிய மின்னோட்டங்கள்** (forward currents) என்பர். சமநிலையில் சார்பு மின்னழுத்தம் ஏதும் இல்லாதபொழுது முன்னோக்கிய மின்னோட்டமும் திருப்பிய மின்னோட்டமும் சமமாயிருக்கின்றன. அஃதாவது, மேற்கண்ட மின்னோட்டங்களின் ஒவ்வொன்றின் மதிப்பும் I_o ஆக இருக்கும். அதனால் சமநிலையில் சார்பு (bias) மின்னழுத்தம் ஏதும் இல்லாதபொழுது P-N சந்தியின் வழியே செல்லும் மொத்த மின்னோட்டத்தின் மதிப்புச் சுழியாகும். ஆனால், சார்பு மின்னழுத்தம் 'V' யை 'P' பகுதி நேர்மின்னழுத்ததிலும், 'N' பகுதி எதிர்மின்னழுத்தத்திலும் இருக்குமாறு செலுத்தினால் படம் 10.1 (ஆ)வில் காட்டியவாறு எலெக்ட்ரான் ஆற்றல் மட்டங்கள் மாறும். இதனால் தடுப்பு மின்னழுத்தம் eV எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு அளவு குறைகிறது.

முன்னோக்கியதிசையில் எலெக்ட்ரான் மின்னோட்டமும் (N பகுதியிலிருந்து P பகுதிக்கும்), துளை மின்னோட்டமும் (P பகுதியிலிருந்து N பகுதிக்கும்) அதிகரிக்கின்றன. அதனால் சார்பு மின்னழுத்தத்தினால் முன்னோக்கிய மின்னோட்டத்தின் மொத்த மதிப்பு I_o ஐவிட மிக அதிகமாயுள்ளது ; தடுப்பு மின்னழுத்தம் குறைவதால் திருப்பிய திசையில் செல்லும் மின்னோட்டத்தில் எவ்விதப் பாதிப்பும் இராது. ஏனெனில், அம்மின்னோட்டம் மொத்தச் சிறுபான்மை மின்னூட்டக் கடத்திகளைச் சார்ந்துள்ளதேயன்றித் தடுப்பு மின்னழுத்தத்தின் மதிப்பினைச் சார்ந்ததில்லை. பொதுவாய் டையோடுகளில் மின்னோட்டம், சார்பு மின்னழுத்தத்தின் அடுக்குக்குறிச் சார்பாய் அமையும். ஏனென்னில் ஒருமின்னூட்டக் கடத்தி ஒருதடுப்பின்வழியே மேலே ஏறித்தாவுதலுக்கு உரிய நிகழ்தகவு தடுப்பு உயரத்தோடு (barrier height) அடுக்குக்குறி சார்பில் அமைகிறது.

எனவே முன்னோக்கிய மின்னோட்டத்தின் சமன்பாட்டைப் பின்வருமாறு எழுதலாம்

$$I_{\text{முன்னோக்கிய}} = I_o\,(\exp\,(eV/kT) - 1) \approx I_o \exp(eV/kT) \tag{10.1}$$

அதேசமயம் சார்பு மின்னழுத்தம் V யைத் திருப்பிய திசையில், அஃதாவது 'P' பகுதியில் எதிர்மின் அழுத்தமும், 'N' பகுதியில் நேர்மின் அழுத்தமும் இருக்குமாறு, செலுத்தினால் தடுப்பு மின்னழுத்தம் சந்தியில் படம் 10.1 (இ)யில் காட்டியவாறு கூடுகிறது. அதனால், முன்னோக்கிய மின்னோட்டத்தின் மதிப்பு மிகக்குறைகிறது. ஆனால், திருப்பிய மின்னோட்டத்தின் மதிப்பு I_o என்ற அளவிலேயே மாறாமல் இருக்கிறது. அதனால், மொத்தத் திருப்பிய மின்னோட்ட அளவு,

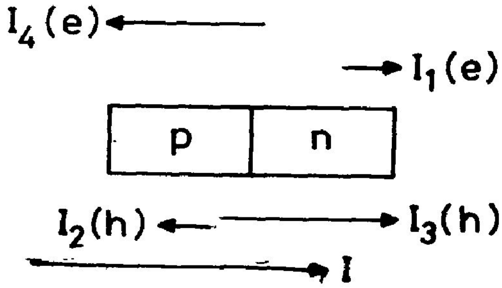
$$I_{\text{திருப்பிய}} = I_o\,[1 - \exp(-\,eV/kT)] \approx I_o \tag{10.2}$$

அதனால் ஒரு P-N சந்தி அலைதிருத்தியாய் வேலைசெய்ய முடியும். அஃதாவது, அது மின்னோட்டத்தை ஒருதிசையில் மட்டும் கடத்தும். எதிர்த்திசையில் மின்னோட்டத்தைக்

கடத்தாது. அதனால் நாம் மாறு திசை மின்னழுத்தத்தை உள்ளீட்டுச்சைகையாக (input signal) P-N சந்தியில் செலுத்தினால் நமக்குத் திருத்தப்பட்ட (rectified) பாதிசைன் வடிவ மின்னோட்டத் துடிப்புகள் வெளியீட்டுச்சைகையாக (output signal)க் கிடைக்கும். இதனை ஒருவடிப்பான் (filter) வழிசெலுத்தி ஒருதிசை மின்னோட்டமாய் மாற்றலாம்.

10.2.2 அலைதிருத்திச் சமன்பாடு (rectifier equation)

P-N சந்தியில் பாயும் மின்னோட்டத்தின் நான்கு உறுப்புகளையும், அவற்றின் திசைகளையும் படம் 10.2 காட்டுகிறது.



படம் 10.2 P-N சந்தியில் உள்ள மொத்த மின்னோட்டத்தின் (I) நான்கு உறுப்புகளும், அவற்றின் திசைகளும்.

இடப்பக்கத்திலிருந்து வலப்பக்கமாய்ப் பாயும் மின்னோட்டங்கள்.	வலப்பக்கத்திலிருந்து இடப்பக்கமாய்ப் பாயும் மின்னோட்டங்கள்.
$I_1(e)$ – சிறுபான்மை எலெக்ட்ரான்களால் வரும் மின்னோட்டம்	$I_2(h)$ – சிறுபான்மை துளைகளால் வரும் மின்னோட்டம்
$I_3(h)$ – பெரும்பான்மை துளைகளால் வரும் மின்னோட்டம்	$I_4(e)$ – பெரும்பான்மை எலெக்ட்ரான்களால் வரும் மின்னோட்டம்.

P-N சந்தியில் பாயும் மின்னோட்டத்தின் நான்கு உறுப்புகள் பின்வருமாறு:

1) மின்னோட்டம் I_1 சிறுபான்மை மின்னூட்டக் கடத்திகளான '*P*' பகுதி கடத்துப்பட்டையிலுள்ள எலெக்ட்ரான்கள், 'N' பகுதி கடத்துப்பட்டைக்குப் போவதால் வருகிறது. அது படத்தில் காட்டியபடி இடப்பக்கத்திலிருந்து வலப்பக்கத்தில் பாய்கிறது. இந்த மின்னோட்டம் முன்னோக்கிய சார்பு மின்னழுத்தத்தாலும், திருப்பிய சார்புமின்னழுத்தத்தாலும் பாதிக்கப்படுவதில்லை. அஃதாவது, I_1 கூடுவதோ, குறைவதோ இல்லை. ஏனெனில், சார்பு மின்னழுத்தம் எவ்வாறு இருந்தாலும் தடுப்பு மின்னழுத்தம் எப்பொழுதும் 'N' பகுதியை நோக்கித் தாழ்ந்திருப்பதால், 'P' பகுதியிலிருந்து வரும் எந்த ஓர் எலெக்ட்ரானும் சந்தியின் எல்லையை அடைந்தவுடன் எளிதாய் 'N' பகுதிக்குக்கடந்துவிடுகிறது.

2) மின்னோட்டம் I_2 சிறுபான்மை மின்னூட்டக் கடத்திகளான 'N' பகுதி இணைதிறன் பட்டையிலுள்ள துளைகள், 'P' பகுதி இணைதிறன்பட்டைக்குப் போவதால் வருகிறது. அது படத்தில் காட்டியவாறு வலப்பக்கத்திலிருந்து இடப்பக்கத்திற்குப்

பாய்கிறது. இங்கு நாம் ஒன்றனை நினைவு வைத்துக் கொள்ளவேண்டும். அஃதாவது, துளை மின்னோட்டமும், எலெக்ட்ரான் மின்னோட்டமும் எதிர்த்திசைகளில் பாய்ந்தால், வழக்கமான (conventional) மின்னோட்டச் செறிவைக் கணக்கிடும்போது மேற்கண்ட இரு எதிர் மின்னோட்டங்களையும் கூட்ட வேண்டும். அதனால், பெரும்பான்மை (majority) எலெக்ட்ரான் மின்னோட்டம் வழக்கமான மின்னோட்டத்திசைக்கு எதிர்த்திசையிலும், பெரும்பான்மைத் துளைமின்னோட்டம் வழக்கமான மின்னோட்டத்திசையிலும் பாய்கின்றன. இவ்விரு மின்னோட்டங்களும் எதிரெதிர்த்திசைகளில் செல்லும்போது வழக்கமான மின்னோட்டத்தின் மதிப்பு இவ்விரு எதிர்மின்னோட்ட எண்ணளவு(modulus)களின் கூட்டுத்தொகையாகும். அதனால், வழக்கமான மின்னோட்ட மதிப்புக்கூடுகிறது. துளை மின்னோட்டமும், எலெக்ட்ரான் மின்னோட்டமும் ஒரே திசையில் செல்லும்பொழுது வழக்கமான மின்னோட்டத்தின் மதிப்பு இவ்விரு மின்னோட்ட எண்ணளவுகளின் வித்தியாசம் ஆகும். அதனால், அதன் மதிப்புக்குறைகிறது. மின்னோட்டம் I_2 – ம் சார்பு மின்னழுத்தத்தைச் சார்ந்ததில்லை.

3) மின்னோட்டம் I_3 பெரும்பான்மை மின்னூட்டக் கடத்திகளான 'P' பகுதி இணைதிறன்பட்டையிலுள்ள துளைகள், 'N' பகுதி இணைதிறன்பட்டைக்குச் செல்வதால் வருகிறது. இம்மின்னோட்டம் இடப் பக்கத்திலிருந்து வலப் பக்கமாய்ப் பாய்கிறது. இது சார்பு மின்னழுத்தத்தைச் சார்ந்துள்ளது. 'P' பகுதி நேர்மின்னழுத்தத்திலும் 'N' பகுதி எதிர்மின்னழுத்தத்திலும் இருக்கும்போது I_3 யின் மதிப்பு மிக அதிக அளவில் உயர்கிறது. அது சார்பு மின்னழுத்தத்தின் அடுக்குக்குறிச் சார்பாயமையும். அதேசமயம் 'P' பகுதி எதிர்மின்னழுத்தத்திலும், 'N' பகுதி நேர்மின்னழுத்தத்திலும் இருந்தால் I_3யின் மதிப்பு மிகஅதிகஅளவில் குறைகிறது. அச்சமயம் ஏறத்தாழ $I_3 \approx 0$

4) மின்னோட்டம் I_4 பெரும்பான்மை மின்னூட்டக் கடத்திகளான 'N' பகுதி கடத்துப் பட்டையிலுள்ள எலெக்ட்ரான்கள், 'P' பகுதி கடத்துப்பட்டைக்குச் செல்வதால் வருகிறது. இம்மின்னோட்டம் வலப்பக்கத்திலிருந்து இடப்பக்கமாகப் பாய்கிறது. இது சார்பு மின்னழுத்தத்தைச் சார்ந்துள்ளது. அஃதாவது, சார்பு மின்னழுத்தத்தால் I_3 எங்ஙனம் மாறுகிறதோ, அதேபோல் I_4 ம் மாறுகிறது.

அதனால், வழக்கமான மின்னோட்டத்தின் மொத்த மதிப்பு,

$$I = (I_3 + I_4) - (I_1 + I_2) \tag{10.3}$$

இம்மின்னோட்டம் இடப்பக்கத்திலிருந்து வலப்பக்கமாய்ப் பாய்கிறது. N பகுதியிலிருந்து P பகுதியை நோக்கிப்பாயும் எலெக்ட்ரான்களினால் வரும் பெரும்பான்மையான மின்னோட்டம் சார்பு மின்னழுத்தத்திற்கு மிகுதியான உணர்திறனை (sensitivity)க் காட்டுகிறது. ஏனெனில், N வகைக்குறைகடத்தியிலுள்ள எலெக்ட்ரான்கள் N பகுதியிலிருந்து P பகுதியை நோக்கி வரும்போது ஒரு தடுப்பு மின்னழுத்ததைச் சந்திக்கின்றன. அத்தடுப்பினை உயர்த்தவோ, குறைக்கவோ இச்சார்புமின்னழுத்தத்தால் முடியும். தடுப்பின் உயரம் சிறிது குறைந்தாலும் எலெக்ட்ரான் மின்னோட்டம்

அதிகஅளவில் உயருகிறது என்பதையும் கண்டோம். அதனால், முன்னோக்கிய சார்பு மின்னழுத்தம் 'V' என இருக்கும்போது பெரும்பான்மை எலெக்ட்ரான்களால் வரும் மின்னோட்டம்

$$I_4 = C_4 \exp\,[-e\,(V_o - V)/kT] \tag{10.4}$$

இங்கு C_4 என்பது ஒரு மாறிலி; V_o என்பது தொடுமின்னழுத்தம் (வோல்ட்டில்). மேலே கண்ட பெரும்பான்மை எலெக்ட்ரான் மின்னோட்டத்திற்குக் கூறியவாதங்களைப் பெரும்பான்மை துளைகளுக்கும் எடுத்துக்கொண்டால், முன்னோக்கிய சார்பு மின்னழுத்தம் 'V' என இருக்கும்போது பெரும்பான்மை துளைகளினால் வரும் மின்னோட்டம்,

$$I_3 = C_3 \exp\,[\,(-e\,(V_o - V)/kT)\,] \tag{10.5}$$

இங்கு C_3 ஒரு மாறிலியாகும். வெப்பச் சமநிலையில் இருக்கும்போதும், சார்பு மின்னழுத்தம் சந்தியில் ஏதும் இல்லாதபோதும், சந்தி வழியே செல்லும் மொத்த மின்னோட்டத்தின் மதிப்புச் சுழி என்பது நமக்குத் தெரிந்ததே. அதனால், $V = 0$ என இருக்கும்போது

$$I_1 = I_4;\; I_2 = I_3$$

$$I_1 = I_4 = C_4 \exp\,(-e\,V_o/kT);\; I_2 = I_3 = C_3 \exp\,(-e\,V_o/kT) \tag{10.6}$$

மேலே கண்ட சமன்பாடுகள்மூலம் C_3 மற்றும் C_4 ஆகியவற்றின் மதிப்புகளை முறையே I_1, I_2 ஆகியவற்றில் எழுதிச்சமன்பாடுகள் (10.4), (10.5) ஆகியவற்றில் இட,

$$I_4 = I_1 \exp\,(e\,V/kT);\quad I_3 = I_2 \exp\,(e\,V/kT) \tag{10.7}$$

சமன்பாடு (10.3)ல் I_4, I_3 ஆகியவற்றின் மதிப்புகளைச் சமன்பாடு (10.7)ல் இருந்து எடுத்து இட, நமக்குக் கிடைப்பது,

$$I = (I_1 + I_2)\,[\exp\,(e\,V/kT) - 1]$$

(அல்லது)

$$\boxed{I = I_o\,[\exp\,(e\,V/kT) - 1]} \tag{10.8}$$

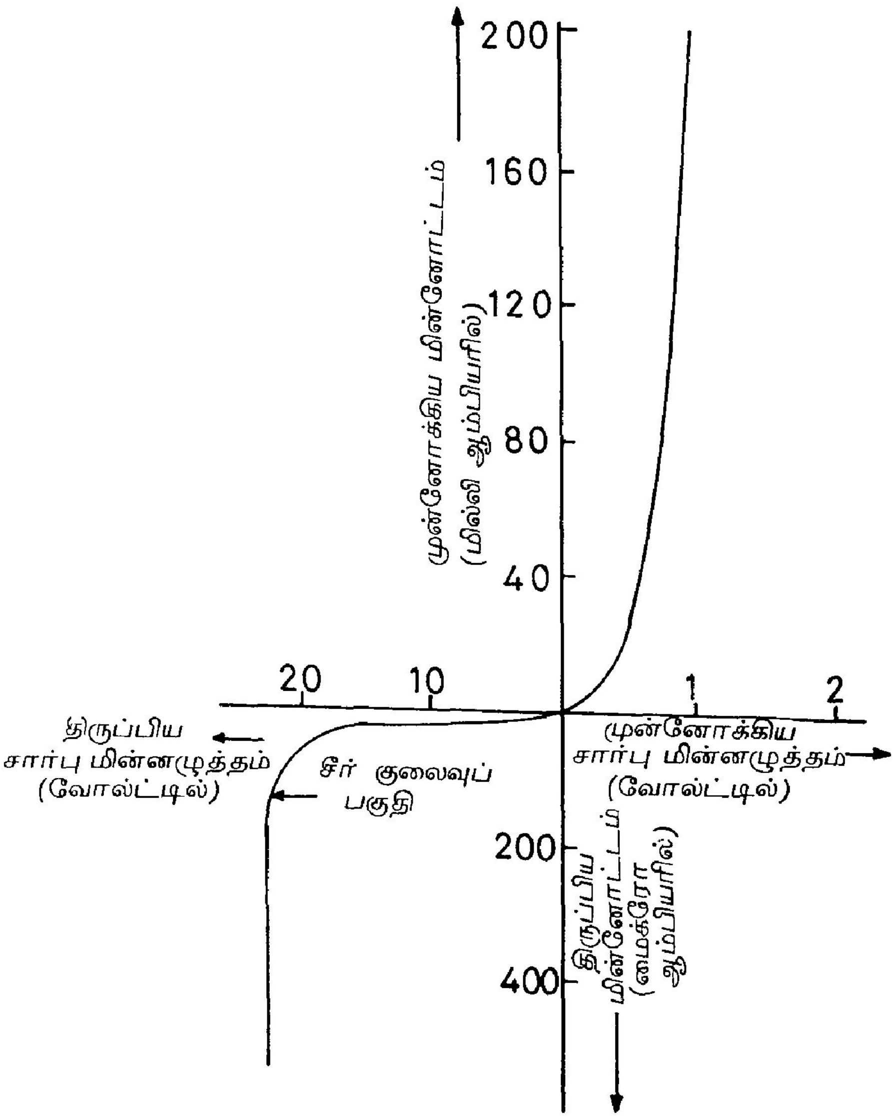
இச் சமன்பாடே அலைதிருத்திச்சமன்பாடாகும்.

இங்கு $I_o = I_1 + I_2$, மேலும் I_o என்னும் மின்னோட்டத்தைத் **திருப்பிய தெவிட்டு மின்னோட்டம்** (reverse saturation current) என்பர். இது சார்பு மின்னழுத்தத்தைச் சார்ந்ததில்லை. அஃதாவது, திருப்பிய சார்பு மின்னழுத்தத்தின் போதும், முன்னோக்கிய சார்பு மின்னழுத்தத்தின் போதும், மின்னோட்டம் I_o இன் மதிப்பு ஒரே அளவில் உள்ளது. இது மின்னூட்டக் கடத்திகளின் விரவலால் வருகிறது. விரவல்முறை, மின்னூட்டக் கடத்திகளின் செறிவின் சரிவினை (gradient) மட்டும் சார்ந்துள்ளது. அதனால், சார்பு மின்னழுத்த வேறுபாடுகளால் அஃது ஒன்றும் மாறாது.

நேர்வு 1 : முன்னோக்கிய சார்பு மின்னழுத்தம் $V >> \frac{4kT}{e}$ என்னும் அளவில் செலுத்தப்படுகிறதாய் வைத்துக்கொள்வோம். இதில் 'V' நேர்க்குறியுடைய மின்னழுத்தமாகும். எனவே $\exp(e\,V/kT) >> 1$. அதனால்,

$$I = I_o \exp(eV/kT) \tag{10.9}$$

இச்சமன்பாட்டின் மூலம் முன்னோக்கிய சார்பு மின்னழுத்தத்தினால் மின்னோட்டம் அடுக்குக் குறிசார்பில் கூடுகிறது என்பது தெரிகிறது. மேலும் படம் 10.3லும் இதனைத் தெளிவாய்க் காணலாம்.



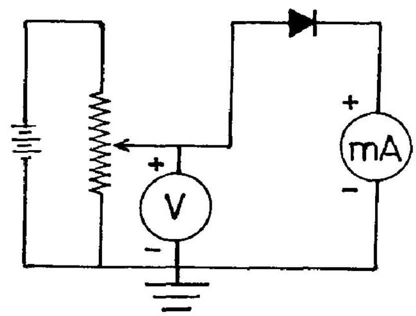
படம் 10.3 : P-N சந்தியின் சார்புமின்னழுத்த–மின்னோட்டப் பண்புகள்.

நேர்வு 2 : திருப்பிய சார்பு மின்னழுத்தம் $|-V| >> \frac{4kT}{e}$ என்னும் அளவில் செலுத்தப்படுவதாய் வைத்துக்கொள்வோம். திருப்பிய சார்பு மின்னழுத்தம் எதிர்க்குறி உடையதாகும். பின் $\exp(-eV/kT) << 1$.

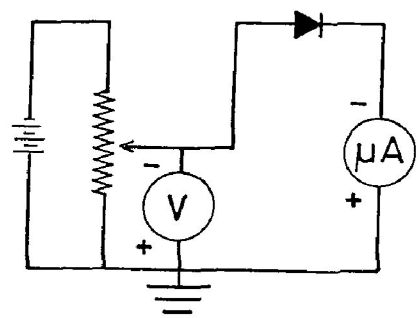
$$\therefore I = -I_0 \text{ (திருப்பிய தெவிட்டு மின்னோட்டம்)} \qquad (10.10)$$

அஃதாவது, திருப்பிய சார்பு மின்னழுத்தத்தில் நமக்குக் கிடைப்பது மாறாத தெவிட்டு மின்னோட்டமாகும். ஆனால், திருப்பிய சார்பு மின்னழுத்தத்தைக் கூட்டிக் கொண்டே போனால் பொருளில் சீர்குலைவு (breakdown) உண்டாகிறது. அதனால், அப்போது படம் 10.3இல் காட்டியவாறு அதிகமான மின்னோட்டம் பாய வாய்ப்பு ஏற்படுகிறது.

10.3 P-N *சந்தியின் பண்பைக் காணல்*



(அ)



(ஆ)

படம் 10.4 **P–N** *சந்தியின் சிறப்பு வரையை வரையப் பயன்படும் சுற்றுகள். (அ) முன்னோக்கிய சார்பு மின்னழுத்தத்தில்* **P-N** *சந்தி (ஆ) திருப்பிய சார்பு மின்னழுத்தத்தில்* **P-N** *சந்தி*

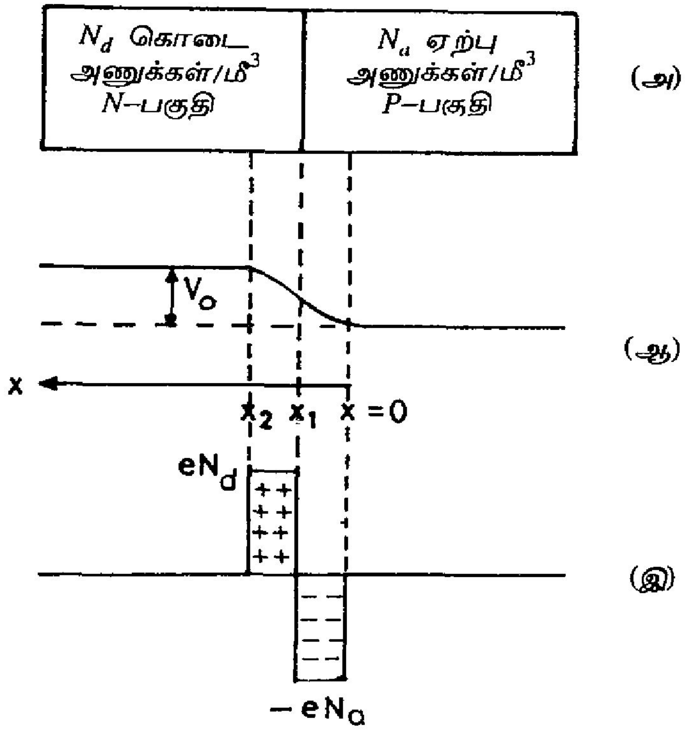
P-N சந்தி டையோடின் சிறப்பு வரையை முன்னோக்கிய சார்பு மின்னழுத்தத்திலும், திருப்பிய சார்பு மின்னழுத்தத்திலும் காணபடம் 10.4இல் காட்டியுள்ள மின்சுற்றுகள் (circuits) பயன்படுத்தப்படுகின்றன. இதில் முன்னோக்கிய சார்பு மின்னழுத்தத்தில் டையோடின் 'P' பகுதி நேர்மின்னழுத்தம் பெறுமாறு ஒரு மின்தடைமாற்றி மூலம் மின்கல அடுக்குக்கு இணைப்பு அளிக்கப்படுகிறது. மின்தடை மாற்றி மூலம் சார்பு மின்னழுத்தத்தைப் பலமதிப்புகளில் மாற்றியமைக்கலாம். முதலில் சுழியிலிருந்து தொடங்கிப் படிப்படியாய் 0.25 வோல்ட்டாகக் கூட்டி 6 வோல்ட்டுவரை செல்ல வேண்டும். அதே சமயத்தில் ஒவ்வொரு மின்னழுத்தத்திற்கும் உரிய மின்னோட்டத்தையும் மில்லி மின்னோட்டமானி (milli ammeter) மூலமாய்க் குறித்துக் கொள்ள வேண்டும். கொடுக்கப்படும் மின்னழுத்தத்தை மின் சுற்றில் இணைத்துள்ள மின்னழுத்தமானி (voltmeter) மூலம் தெரிந்துகொள்ளலாம். இப்பொழுது படம் 10.4 (ஆ)வில்

காட்டியுள்ளவாறு மின்சுற்றை இணைக்க வேண்டும். இப்போது P-N சந்தி திருப்பிய சார்பில் உள்ளது. சீர்குலைவை ஏற்படுத்தும் சார்பு மின்னழுத்தம்வரை மைக்ரோ மின்னோட்டமானியில் மாறாத மின்னோட்ட மதிப்பினைக் கா. ணலாம். சீர்குலைவு வந்தவுடன் மைக்ரோ மின்னோட்டமானி, மின் சுற்றில் அதிக அளவு மின்னோட்டம் பாய்வதைக் காட்டும். மேற்கண்ட அளவீடுகளைக் கொண்டு டையோடின் நிலைச் சிறப்பு (static characteristic) வரையை வரையலாம்.

10.4. P-N சந்தியின் தடுப்பு மின்னழுத்தமும், மின்தேக்குதிறனும்

இதுவரை நாம் P-N சந்தியின் மின்னழுத்தத்திற்கும் அதில் பாய்கின்ற மின்னோட்டத்திற்கும் உள்ள தொடர்பினைப்பற்றியும், அதில் தடுப்பு மின்னழுத்தம் முக்கியப்பங்கு வகிப்பதுபற்றியும் விரிவாகக் கண்டோம். ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டம் ‘P’, ‘N’ பகுதிகளில் ஒரே ஆற்றல் இணைப்பெறுமையில் இருப்பதற்காக ‘N’ பகுதியில் சிறிது கீழிறங்கியும், ‘P’ பகுதியில் சிறிது மேலேறியும் இடம்பெயர்வதால் இந்தத் தடுப்பு மின்னழுத்தம் வருகிறது. இதனையே வேறு விதமாகவும் கூறலாம். ‘P’ பகுதியில் மிகுதியான துளைகளும், ‘N’ பகுதியில் மிகுதியான எலெக்ட்ரான்களும் உள்ளன. ‘P’ பகுதியில் மிகக்குறைவான எலெக்ட்ரான்களும், ‘N’ பகுதியில் மிகக்குறைவான துளைகளும் உள்ளன. அதனால், மின்னூட்டக் கடத்திகளின் செறிவில் சரிவு இருப்பதால் விரவல் நடைபெறுகிறது. அஃதாவது, ‘P’ பகுதியிலுள்ள துளைகள் ‘N’ பகுதியை நோக்கிவரும்; ‘N’ பகுதியிலுள்ள எலெக்ட்ரான்கள் ‘P’ பகுதியை நோக்கி வரும். சந்தியில் துளைகளும், எலெக்ட்ரான்களும் ஒன்றிடுவதால் அங்கு நகரும் மின்னூட்டமற்ற நிலை உருவாகிறது.

குறிப்பாகச் சந்திக்கு அருகில் ‘P’ பகுதியில் எதிர் அயனியாக்கப்பட்ட ஏற்பு அணுக்களும், ‘N’ பகுதியில் நேர்அயனியாக்கப்பட்ட கொடையணுக்களும் இருக்கும். இவற்றில் மின்னூட்டம் இருந்தாலும் இவை நகரா. அதனால் சந்தியில் நகரும் மின்னூட்டக் கடத்திகளின் (mobile charge carriers) செறிவு சுழியாயிருக்கும். இதனையே சூழ்மின்னூட்டப் பகுதி (space charge region) என அழைப்பர். மேலும், இங்கு நகரும் மின்னூட்டக் கடத்திகளின் செறிவு வற்றிப்போய் இருப்பதால் இதனைவற்றிய பகுதி (depletion region) எனவும் அழைப்பர். சமநிலையில் வற்றியப்பகுதியில் குறிப்பாய் ‘P’ பகுதியில் நகரா எதிர்அயனிகளும், ‘N’ பகுதியில் நகரா நேர்அயனிகளும் இருக்கும். மிகக்குறைவான தூரத்தில் ஒருநகரா எதிர்மின்னூட்டமும், ஒரு நகரா நேர்மின்னூட்டமும் விலக்கப்பட்டிருந்தால் அந்த அமைப்பு மின்இருமுனைவு (electrical dipole) போல் செயல்படும். அதனால், வற்றியபகுதியில் மின்இருமுனைவுகள் அநேகம் தோன்றி, ஒருமின்புலத்தை உண்டாக்குகின்றன. மின்புலம் இருந்தால் மின்னழுத்தமும் அதனுடன் இருக்க வேண்டும். அந்த மின்னழுத்தத்தையே தடுப்பு மின்னழுத்தம் என அழைக்கிறோம். ஒருமின்இருமுனைவில் உள்ள இருமின்னூட்டங்களுக்கு இடையே உள்ள தூரம்தான் தடுப்பு (barrier)த் தடிமனாகும். மேலும், நகரா மின்னூட்டங்கள் தடுப்பு எல்லையின் இருபக்கங்களிலும் சேகரிக்கப்படுவதால் அஃது ஒரு மின்தேக்கியாயும் செயல்படுகிறது. அதனால், நாம் தடுப்பு மின்அழுத்தத்தின் மதிப்பினையும், மின்தடுப்பினால்வரும் மின்தேக்கியின் மின்தேக்குத்திறனையும், வற்றியபகுதியின் தடிமனையும் பின்வருமாறு கணக்கிடப்போகிறோம்.



படம் 10.5 : P-N *சந்தியின் தடுப்பு மின்னழுத்தமும், சூழ்மின்னூட்ட அமைப்பும்.*

படம் 10.5 (அ) வில் $x = x_1$ என்ற இடத்தில் 'P' பகுதி திடீரென்று 'N' பகுதியாய் மாறுவதாய்க்காட்டப்பட்டுள்ளது. மேலும், அதேபடத்தின் (ஆ) வில் சந்தி வெப்பச்சமநிலையில் இருக்கும்போதும், தடுப்புமின்னழுத்தம் V_o ஆக இருக்கும்போது வழக்கமான மின்னழுத்தம் N பகுதியில் எங்ஙனம் இருக்கும் என்பது காட்டப்பட்டுள்ளது. இறுதியாயுள்ள படமான (இ) யில் சந்தியில் ஏற்படும் சூழ்மின்னூட்ட அமைப்பு உள்ளது. படத்தில் காட்டியபடி $x = x_1$ என்ற இடத்தில் 'N' பகுதி திடீரென்று 'P' பகுதியாக மாறுகிறது என வைத்துக்கொள்வோம். மேலும் 'N' பகுதியின் எல்லா இடங்களிலும் கொடையணுக்களின் செறிவு மாறாமல் இருப்பதாகவும் அதன் மதிப்பு எல்லா இடங்களிலும் N_d கொடையணுக்கள்/மீ^{3} எனக் கொள்வோம். அதேபோல் 'P' பகுதியின் எல்லா இடங்களிலும் ஏற்பு அணுக்களின் செறிவு மாறாமல் N_a ஏற்பு அணுக்கள் /மீ^{3} என இருப்பதாயும் கொள்வோம். $x = 0$ என வைத்துக் கொண்டு $x \leq 0$ என்னும் பகுதிகளில் எல்லாம், மின்னழுத்தம் ஒருமாறிலி எனவும் அதன் மதிப்புச்சுழி எனவும் கொள்வோம். அதேபோல் $x = x_2$ என்ற புள்ளியில் மின்னழுத்தம் ஒருமாறிலி எனவும், அதன் மதிப்பு வெப்பச்சமநிலையில் தடுப்புமின்னழுத்தத்திற்கு (V_o) சமமாயுள்ளது எனவும் கொள்வோம். படத்தில் காட்டியுள்ளவாறு x_1, x_2 ஆகிய இருபுள்ளிகளுக்கு இடையே உள்ள பகுதியில் எலெக்ட்ரான் அடர்த்தி மிகமிகக் குறைவால், அப்பகுதியில் சூழ்மின்னூட்ட அடர்த்தி

$e\,N_d$ எனவும், அதேபோல் $x = 0, x_1$ ஆகிய இருபுள்ளிகளுக்கும்இடையே உள்ள பகுதியில் சூழ்மின்னூட்ட அடர்த்தி, $-e\,N_a$ எனவும் கொள்வோம். பாய்சான் சமன்பாடுமூலம் தடுப்பு மின்னழுத்தத்தைச் சூழ்மின்னூட்ட மதிப்பிலிருந்து கண்டுபிடிக்கலாம். பொதுவாய்ப் பாய்சான் சமன்பாடு பின்வருமாறு இருக்கும்: $d^2 V/dx^2 = -\rho/\varepsilon$; இதில் ‘ρ’ என்பது மின்னூட்டங்களின் அடர்த்தி, ε என்பது பொருளின் மின் மறுப்புத்திறன் அல்லது முனைவாக்க அனுமதித்திறன் ஆகும். அதனால்,

$$\frac{d^2 V_1}{dx^2} = \frac{e\,N_a}{\varepsilon} \quad (0 \le x \le x_1 \text{ என்ற பகுதியில்}) \tag{10.11}$$

$$\frac{d^2 V_2}{dx^2} = -\frac{e\,N_d}{\varepsilon} \quad (x_1 \le x \le x_2 \text{ என்ற பகுதியில்}) \tag{10.12}$$

எல்லை நிபந்தனைகள் :

1) $x = 0$ என இருக்கும்போது $d\,V_1/dx = 0$; மற்றும் $V_1 = 0$.

2) $x = x_1$ என இருக்கும்போது $\left(\frac{dV_2}{dx}\right)_{x = x_1} = \left(\frac{dV_1}{dx}\right)_{x = x_1}$; $V_1\,(x_1) = V_2\,(x_1)$.

3) $x = x_2$ என இருக்கும்போது $V_2\,(x_2) = V_0$; $\left(\frac{dV_2}{dx}\right)_{x = x_2} = 0$.

முதல் எல்லைநிபந்தனையைப் பயன்படுத்தி சமன்பாடு (10.11)ஐ தொகையப்படுத்த நமக்குக் கிடைப்பது,

$$\left(\frac{dV_1}{dx}\right) = \frac{e\,N_a}{\varepsilon}\,x \quad (0 \le x \le x_1 \text{ என்ற பகுதியில்}) \tag{10.13}$$

அதனை மேலும் ஒருதடவை தொகையப்படுத்த,

$$V_1 = \frac{eN_a}{2\varepsilon}\,x^2 \quad (0 \le x \le x_1 \text{ என்ற பகுதியில்}) \tag{10.14}$$

அதனால் நாம் $x = 0$ என்ற புள்ளியிலிருந்து இடப்பக்கமாய்ப் போனால் மின்னழுத்தம், தூரத்தின் இருமடிக்கு நேர்விகிதத்தில் அமைகிறது.

இனிச் சமன்பாடு (10.12)ஐ தொகையப்படுத்துவோம். சமன்பாடு (10.14) மூலம்

$$V_1\,(x_1) = \frac{eN_a}{2\varepsilon}\,x_1^2$$

$$\left(\frac{dV_1}{dx}\right)_{x=x_1} = \frac{eN_a}{\varepsilon} x_1 \tag{10.15}$$

சமன்பாடு (10.12)ஐ தொகையப்படுத்த,

$$\left(\frac{dV_2}{dx}\right)_{x=x_1} = \frac{-eN_d}{\varepsilon} x_1 + A_1 \tag{10.16}$$

ஆனால், இரண்டாம் எல்லை நிபந்தனையின்படி

$$\left(\frac{dV_2}{dx}\right)_{x=x_1} = \left(\frac{dV_1}{dx}\right)_{x=x_1}$$

அதனால் சமன்பாடுகள் (10.15) மற்றும் (10.16) ஆகியவை சமம். எனவே

$$\frac{-eN_d}{\varepsilon} x_1 + A_1 = \frac{eN_a}{\varepsilon} x_1$$

$$\therefore\ A_1 = \frac{ex_1}{\varepsilon} (N_a + N_d)$$

சமன்பாடு (10.16)ஐ மறுபடியும் தொகையப்படுத்த,

$$V_2(x) = \frac{-eN_d}{2\varepsilon} x^2 + A_1 x + A_2 \tag{10.17}$$

$x = x_1$ என இருக்கும்பொழுது,

$$V_2(x_1) = V_1(x_1) = \frac{-eN_d}{2\varepsilon} x_1^2 + \left[\frac{ex_1}{\varepsilon}(N_d + N_a)\right] x_1 + A_2$$

சமன்பாடு (10.14)ஐ பயன்படுத்தி, $V_1(x_1)$இன் மதிப்பை இதில் இட,

$$\frac{eN_a}{2\varepsilon} x_1^2 = \frac{-eN_d}{2\varepsilon} x_1^2 + \frac{ex_1^2}{\varepsilon}(N_d + N_a) + A_2$$

$$\therefore A_2 = \frac{-ex_1^2}{2\varepsilon}(N_a + N_d)$$

எனவே, $$V_2(x_2) = V_0 = \frac{-eN_d}{2\varepsilon} x_2^2 + \frac{e}{\varepsilon}(N_d + N_a) \quad x_1 x_2 - \frac{e}{2\varepsilon}(N_a + N_d) x_1^2 \tag{10.18}$$

x_2 என்ற புள்ளியில் மின்புலத்தின் மதிப்புச் சுழியாகும். ஏனெனில், அங்கு V_0 ஒரு மாறிலி. அதனால், சமன்பாடு (10.17)ஐ x_2ல் வகையிட நமக்குக் கிடைப்பது,

$$\left(\frac{dV_2}{dx}\right)_{x=x_2} = \frac{-eN_d}{\varepsilon}x_2 + \frac{ex_1}{\varepsilon}(N_d + N_a) = 0 \qquad (10.19)$$

$$\therefore x_1 = \frac{N_d}{(N_d + N_a)} x_2$$

சமன்பாடு (10.18)இல் x_1 இன் மதிப்பினை இட்டுப்பின் சுருக்க, நமக்குக் கிடைப்பது,

$$\boxed{V_o = \frac{e}{2\varepsilon}\left(\frac{N_d N_a}{N_d + N_a}\right) x_2^2} \qquad (10.20)$$

அதனால், தடுப்புமின்னழுத்தம் வற்றிய பகுதியின் அகலத்தின் இருமடிக்கு நேர் விகிதத்தில் உள்ளது. சமன்பாடு (10.20)லிருந்து x_2 இன் மதிப்பினைக் கண்டுபிடிக்கலாம்.

அதனால்,
$$x_2 = \left[\frac{2\varepsilon V_o (N_d + N_a)}{e N_d N_a}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (10.21)$$

தடுப்பு மின்னழுத்தம் காணப் பயன்படும் வாய்பாட்டைத் தருவித்தல்:

இயல்பாய குறைகடத்தியில் மின்னூட்டக் கடத்திகளின் அடர்த்தி,

$$n_i = 2\left(\frac{2\pi kT}{h^2}\right)^{3/2} (m_e^* m_h^*)^{3/4} e^{-E_g/2kT}$$

N- வகை குறைகடத்தியில் பெரும்பான்மையான எலெக்ட்ரான்களின் அடர்த்தி,

$$n = N_d = 2\left(\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2}\right)^{3/2} \exp\left[\frac{(E_{fn} - E_c)}{kT}\right]$$

E_{fn} என்பது 'N' வகைக் குறைகடத்தியிலுள்ள ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டத்தைக் குறிக்கும். இதேபோல் 'P' வகைக் குறைகடத்தியில் பெரும்பான்மையான துளைகளின் அடர்த்தி,

$$p = N_a = 2\left(\frac{2\pi m_h^* kT}{h^2}\right)^{3/2} \exp\left(\frac{E_v - E_{fp}}{kT}\right)$$

இதில் E_{fp} என்பது 'P' வகைக் குறைகடத்தியிலுள்ள ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டத்தைக் குறிக்கும். கணக்கீடுகளுக்குப் பொதுவாக $m_e^* = m_h^* = m$ என எடுத்துக்கொள்ளலாம்.

$$\therefore \frac{N_d}{n_i} = \exp\left((E_{fn} - E_c + E_g/2)\ /kT\right)$$

$$\text{மேலும்,}\quad \frac{N_a}{n_i} = \exp\left((E_v - E_{fp} + E_g/2)/kT \right)$$

இணைதிறன்பட்டையின் மேல்மட்டமான E_vஐ குறிப்பீட்டு ஆற்றல் மட்டமாய் (reference energy level) எடுத்து, அதன் மதிப்பினைச் 'சுழி' எனக்கொள்ள அதிலிருந்து கடத்துப்பட்டையின் கீழ்மட்டம், ஆற்றல் இடைவெளியின் அகலத்திற்குச் சமமாயிருக்கும்.

$$\therefore \frac{N_d}{n_i} = \exp\left((E_{fn} - E_g/2)/kT \right)$$

$$\text{மற்றும்}\quad \frac{N_a}{n_i} = \exp\left((E_g/2 - E_{fp})/kT \right)$$

மேற்கண்ட இருசமன்பாடுகளின் மடக்கைகளைக் கண்டுபிடிக்க, நமக்குக்கிடைப்பது

$$kT \log\left[\frac{N_d}{n_i}\right] = E_{fn} - \frac{1}{2} E_g \qquad (10.22)$$

$$kT \log\left[\frac{N_a}{n_i}\right] = \frac{1}{2} E_g - E_{fp} \qquad (10.23)$$

தடுப்புமின்னழுத்தம் $P-N$ சந்தி உருவாகும்போது ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டம் இடம் பெயர்வதால் உண்டாகிறது. அதனால், சமன்பாடு (10.22) மற்றும் (10.23) ஆகியவற்றைக்கூட்ட நமக்குத் தடுப்புமின்னழுத்தத்திற்குரிய சமன்பாடு கிடைக்கும். அஃதாவது,

$$E_{fn} - E_{fp} = eV_o = kT \log\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right) \text{ எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு} \qquad (10.24\ (அ))$$

தடுப்புமின்னழுத்தத்தை வோல்ட்டில் கூற, மேற்கண்ட சமன்பாட்டை அடிப்படை மின்னூட்ட மதிப்பால் வகுக்க வேண்டும்.

$$\boxed{\therefore V_o = \frac{kT}{e} \log\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right)} \text{ வோல்ட்டு} \qquad (10.24\ (ஆ))$$

மாதிரியாய் ஜெர்மேனியத்தை எடுத்துக் கொண்டு அதில் $N_d \approx N_a \approx 10^{21}$ அணுக்கள்/மீ^{3} என வைத்துக் கொள்வோம். அதன் $V_o \approx 0.5$ வோல்ட், $\varepsilon = 141.6 \times 10^{-12}$ பாரடு/மீ என இருக்கும் போது, வற்றிய பகுதியின் அகலம் $x_2 \approx 10^{-6}$ மீட்டர் என இருக்கும். மேலே கண்ட சமன்பாடுகள் சார்புமின்னழுத்தம் இல்லாத பொழுது கண்டுபிடிக்கப்பட்டவையாகும். முன்னோக்கிய சார்பு மின்னழுத்தம் 'V' வோல்ட்டு என இருக்கும்போது சமன்பாடு (10.21) இல் 'V_o' க்குப் பதிலாய் '$V_o - V$' என இடவேண்டும்.

அதனால், கூடிக்கொண்டு போகிற முன்னோக்கிய சார்பு மின்னழுத்தத்தின்போது தடுப்பு அகலமும் குறைந்துகொண்டே செல்கிறது. அதேபோல் கூடிக்கொண்டே போகிற திருப்பிய சார்பு மின்னழுத்தத்தின்போது தடுப்பு அகலமும் மிகுந்து கொண்டே போகிறது.

நாம் இப்போது தடுப்புப் பகுதியின் மின்தேக்குத் திறனைக் கண்டுபிடிப்போம்.

$N-$ பகுதியின் மொத்தப் புறப்பரப்பு நேர்க்குறி மின்னூட்ட அடர்த்தி $= Q = eN_d(x_2 - x_1)$ கூலம்/மீ^{2}.

$P-$ பகுதியின் மொத்தப்புறப்பரப்பு எதிர்க்குறி மின்னூட்ட அடர்த்தி $= -e\,N_a\,x_1$ கூலம்/மீ^{2}.

சமன்பாடு (10.19) மூலம் பின்வரும் சமன்பாட்டைக் காணலாம்.

$$\left| e\,N_d\,(x_2 - x_1)\right| = \left| -e\,N_a\,x_1\right|$$

அஃதாவது, தடுப்புப் பகுதியின் ஓரலகு புறப்பரப்பில் நேர்மின்னூட்டங்களும் எதிர்மின்னூட்டங்களும் எண்ணிக்கையில் சமமான அளவில் உள்ளன.

அதனால், தடுப்புப்பகுதியின் மின்தேக்குதிறன்

$$C = \frac{dQ}{dV_o} = \frac{d}{dV_o}\left[e\,N_d\,(x_2 - x_1)\right]$$

ஆனால் $x_1 = \dfrac{N_d}{(N_d + N_a)}\,x_2$. எனவே

$$C = \frac{d}{dV_o}\left[e\,x_2\,\frac{N_d\,N_a}{N_d + N_a}\right] \tag{10.25}$$

x_2வின் மதிப்பினைச் சமன்பாடு (10.21)லிருந்து இதில் இட்டபின் வகையிட,

$$C = \left[\frac{e\,\varepsilon\,N_d\,N_a}{2V_o\,(N_d + N_a)}\right]^{\frac{1}{2}}$$

மேலும், சமன்பாடு (10.21) மூலம்

$$\frac{\varepsilon}{x_2} = \left[\frac{e\,\varepsilon\,N_d\,N_a}{2V_o\,(N_d + N_a)}\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\therefore\ C = \left[\frac{e\,\varepsilon\,N_d\,N_a}{2V_o\,(N_d + N_a)}\right]^{\frac{1}{2}} = \frac{\varepsilon}{x_2}\ \text{பாரடு/மீ}^2 \tag{10.26}$$

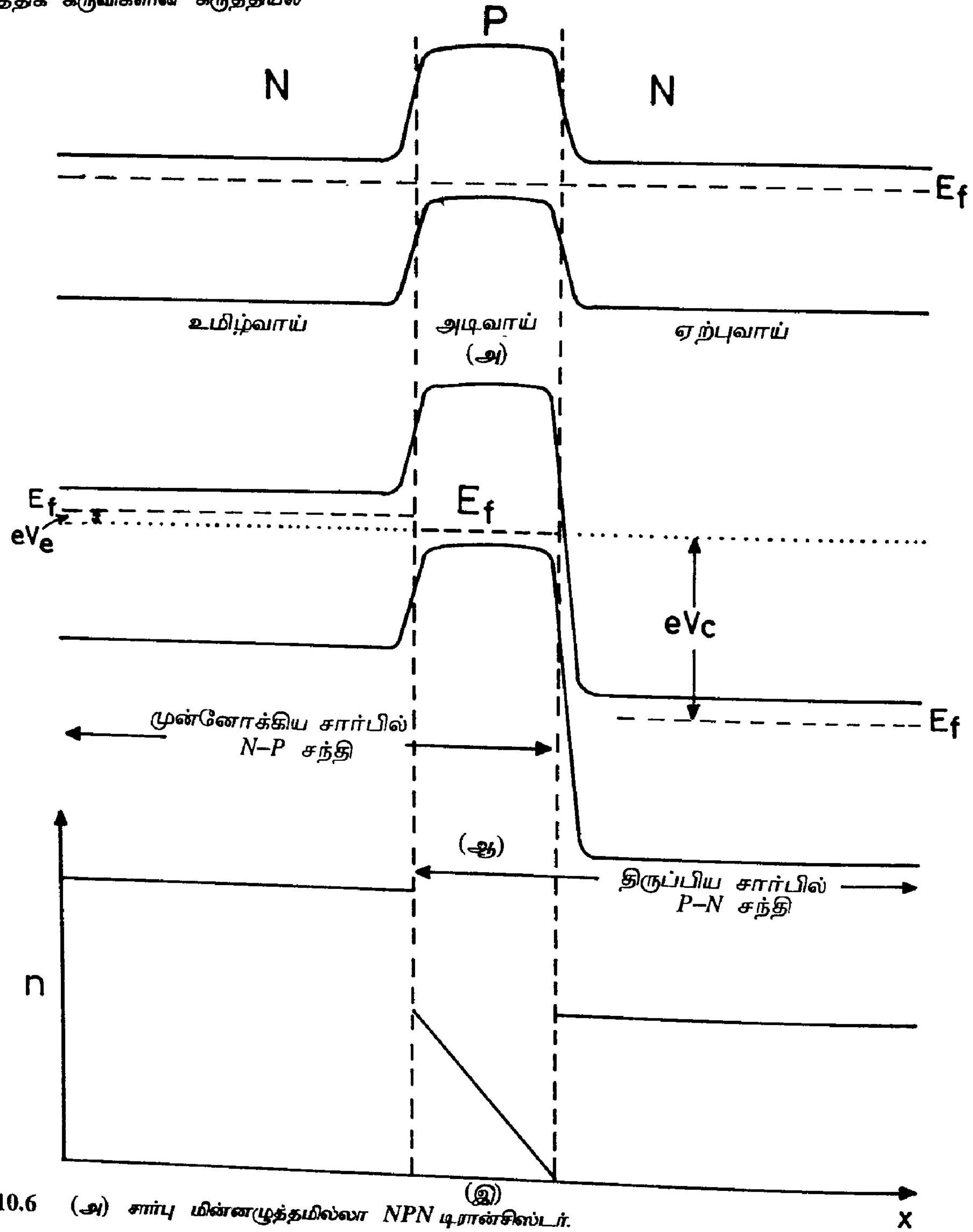
அதனால், தடுப்புப்பகுதி புறப்பரப்பினை ஒரு மீட்டர்^{2} என எடுத்துக்கொண்டால், அதன் மின்தேக்குத்திறன் தகடுகளுக்கு இடையே x_2 தூரமும், அதற்கிடையில் நிரப்பப்பட்ட மின்கடத்தாப் பொருளின் மின்மறுப்புத்திறன் ε பாரடு/மீ ஆகவும் உள்ள ஓர் இணைதகடு மின்தேக்கியின் மின்தேக்குத்திறனுக்குச் சமமாயுள்ளது. குறிப்பாய் ஜெர்மேனியத்தில் $x_2 = 10^{-6}$ மீட்டர் என இருக்கும் பொழுது சந்திமின்தேக்குத்திறன் ஏறத்தாழ $C = 150$ மைக்ரோ பாரடு/மீட்டர்^{2} என இருக்கும்.

10.5 டிரான்சிஸ்டர்கள்

டிரான்சிஸ்டர்கள் வெற்றிடக் குழல் டிரையோடு போலவே மின்பெருக்கியாயும், மின்அலையியற்றியாயும் பயன்படுத்தப்படுகின்றன. இவற்றைச் சந்தி டிரான்சிஸ்டர் (junction transistor), புள்ளிதொடு டிரான்சிஸ்டர் (point contact transistor) என இருவகையாய்ப் பிரிக்கலாம். டிரான்சிஸ்டரில் இரு $P-N$ சந்திகள் உள. அஃதாவது, ஒரேபடிகத்தில் இரு $P-N$ சந்திகளை $N-P-N$ அல்லது $P-N-P$ என்ற இருஅமைப்பு களில் இருக்குமாறு அமைக்கலாம். சார்பு மின்னழுத்தம் அளிக்கப்படும் முறையை வைத்து NPN டிரான்சிஸ்டரை ஒரு வெற்றிடக் குழல் டிரையோடுக்கு ஒப்பிடலாம். சந்தி டையோடுகள் இரண்டு சேர்ந்தஅமைப்பே ஒருசந்தி டிரான்சிஸ்டர் ஆகும். இரு 'N' வகைக்குறைகடத்திகளுக்கு இடையே ஒருமெல்லிய 'P' வகைக் குறைகடத்தியை வளர்த்தால் அஃது ஒரு NPN டிரான்சிஸ்டர் ஆகும். அதேபோல் இரு 'P' வகைக் குறைகடத்திகளுக்கு இடையே ஒருமெல்லிய 'N' வகைக் குறைகடத்தியை வளர்த்தால் அஃது ஒரு PNP டிரான்சிஸ்டர் ஆகும்.

10.5.1. NPN டிரான்சிஸ்டர் செயல்படும் விதம் :

படம் 10.6 (அ) வில் சார்பு மின்னழுத்தத்தில் இல்லா ஒரு NPN டிரான்சிஸ்டரின் பட்டை அமைப்பு காட்டப்பட்டுள்ளது. படம் 10.6 (ஆ) வில் காட்டியவாறு டிரான்சிஸ்டரின் ஒருசந்தி முன்னோக்கிய சார்பிலும், மறுசந்தி திருப்பிய சார்பிலும் உள்ளன. முன்னோக்கிய சார்பு உள்ள சந்தியின் 'N' பகுதி உமிழ்வாய் (emitter) என்றும், P பகுதி அடிவாய் (base) என்றும் வழங்கப்படுகின்றன. அதனால், உமிழ்வாய் – அடிவாய் சந்தி முன்னோக்கிய சார்பு மின்னழுத்தத்தில் உள்ளது. முன்னோக்கிய சார்பில் உள்ள சந்தியில்தான் உள்ளீடுசைகை (input signal)யை இணைக்கவேண்டும். மேலும், திருப்பிய சார்பில் உள்ள மறுசந்தியில் இருந்து வெளியீடுசைகை (output signal)யை ஏற்புவாய் (collector) என்ற N பகுதி வழியே எடுக்க வேண்டும். அதனால் ஓர் உள்ளீடு சைகை 'V'யை உமிழ்வாய் – அடிவாய் சந்தியில் கொடுத்தால் அது தடுப்புமின்னழுத்தத்தை eV எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு அளவு குறைக்கும். இதனால், ஏராளமான மின்னோட்டம் தோற்றுவிக்கப்பட்டு அஃது உமிழ்வாயிலிருந்து அடிவாய்க்குப்பாயும். ஏனெனில், ஒருமுன்னோக்கிய சார்பு மின்அழுத்தம் உடைய P–N சந்தியில் தடுப்பு உயரம் சிறிது குறைந்தாலும் தடுப்பின் வழியே மேலே ஏறித்தாவும் மின்னூட்டக் கடத்திகளின் எண்ணிக்கை தடுப்பு உயர மாற்றத்தின் அடுக்குக்குறிச் சார்பில் அமைகிறது.



படம் 10.6 (அ) சார்பு மின்னழுத்தமில்லா *NPN* டிரான்சிஸ்டர்.

(ஆ) டிரான்சிஸ்டரின் செயல்முறைக்கு ஏற்பச் சார்பு மின்னழுத்தம் கொடுக்கப்பட்ட *NPN* டிரான்சிஸ்டர்.

(இ) நேர்ச; (ஆ)வின் படி டிரான்சிஸ்டர் உள்ளபோது, அதில் எலெக்ட்ரான் அடர்த்தி.

அடிவாயின் அகலம் மிகமிகக் குறைவான அளவில் இருப்பதால் அங்கு அதிகமாயுள்ள துளைகளோடு உமிழ்வாயிலிருந்து வரும் எலெக்ட்ரான்கள் ஒன்றிடாமல் ஏற்புவாய்க்குச் செல்ல முடியும். ஏறத்தாழ ஏற்புவாய்க்குச் செல்லும் எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை உமிழ்வாயிலிருந்து அடிவாய்க்குச் சென்ற எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கைக்குச் சமமாயிருக்கும். மேலும், அடிவாய்-ஏற்புவாய் சந்தி திருப்பிய சார்பு மின்னழுத்தத்தில் இருப்பதால் எலெக்ட்ரான்கள் அடிவாய் – ஏற்புவாய் சந்தி தடுப்புமின்னழுத்தத்தின் மேட்டிலிருந்து அதன் அடியிலுள்ள ஏற்புவாய்க்கு முடுக்கத்துடன் வருகின்றன. அஃதாவது, நீர்வீழ்ச்சி ஒன்றனை எடுத்துக் கொண்டால் அதன் நீர், உயரமான இடத்திலிருந்து தரையை நோக்கி விழும்போது தடை ஏதுமில்லாமல் விரைவாயும் முடுக்கத்தோடும் வருவது அனைவருக்கும் தெரிந்ததே. அதேபோல் அடிவாய் – ஏற்புவாய் திருப்பிய சார்பழுத்தத்தில் இருக்கும்போது அடிவாயை வந்தடைந்த எலெக்ட்ரான்கள் தடுப்பு மின்னழுத்த மேட்டில் உள்ளன. மேலும், திருப்பிய சார்பினால் அவை பள்ளத்தில் உள்ள ஏற்புவாயை நோக்கித் தள்ளப்படுகின்றன. அதனால் அனைத்து அடிவாய் எலெக்ட்ரான்களும் ஒன்றிடுமுறையில் இழப்பு ஏதும் ஏற்படாமல் எளிதாய் ஏற்புவாயை அடைகின்றன.

அடிவாயை வந்தடைந்த எலெக்ட்ரான்களில் ஒருசில, துளைகளோடு ஒன்றிட நேரிடலாம். அதன் காரணமாக நமக்கு மின்னூட்ட கடத்திகளின் எண்ணிக்கையில் சிறிது இழப்பு ஏற்படுகிறது. எனினும், அடிவாய்ப் பகுதியால் எலெக்ட்ரான்களுக்கு முடுக்கத்தையோ, எதிர்முடுக்கத்தையோ கொடுக்க இயலும். இவ்வாறு அது வெற்றிடக் குழல் டிரையோடில் உள்ள கிரிடைப் போல் செயல்படுகிறது. அதனால் உள்ளீடு மின்னழுத்தத்தில் ஏற்படும் மிகச் சிறிய மாற்றம், ஏராளமான முன்னோக்கிய மின்னோட்டத்தை உமிழ்வாயிலிருந்து அடிவாய்க்குச் செல்லும்படி தோற்றுவிக்கிறது. ஏற்புவாயிலுள்ள பளுமின்தடை வழியே இம்மின்னோட்டம் செல்லும்பொழுது அதில் மிகுதியான மின்னழுத்தமாற்றத்தை ஏற்படுத்துகிறது. அதனால், டிரான்சிஸ்டர் சிறிய மின்னழுத்தமாற்றத்தை அதிக மின்னழுத்தமாற்றமாக மாற்றுகிறது; அஃதாவது, மின்னழுத்தப் பெருக்கியாகச் செயல்படுகிறது. மேலும், டிரான்சிஸ்டரின் பெருக்குத் தன்மையில் மின்னோட்டமானது, குறைவான மின்தடையுள்ள பகுதியிலிருந்து அதிக மின்தடை உள்ள பகுதிக்குச் செல்கிறது. அஃதாவது, டிரான்சிஸ்டரில் மின்னோட்டமானது, குறைவான மின்தடைப்பகுதியிலிருந்து அதிக மின்தடை உள்ள பகுதிக்குக் கடத்தப்படுகிறது. அதனால், அதனை மாற்றும் மின்தடை (**tran**sfer re**sistor**) என ஆங்கிலத்தில் கூறி, அந்த வார்த்தையைச் சிறிது குறைத்து டிரான்சிஸ்டர் எனப் பெயரிட்டனர். படம் 10.6 (இ) யில் NPN டிரான்சிஸ்டரில் எலெக்ட்ரான் அடர்த்தி டிரான்சிஸ்டர் செயல்படும்போது எங்ஙனம் இருக்கும் என்பது காட்டப்பட்டுள்ளது.

டிரான்சிஸ்டர் மின்சுற்றுகளில் மூன்றுவகை அடிப்படை இணைப்புகள் உள்ளன.

இவை (1) பொது அடிவாய் இணைப்பு,

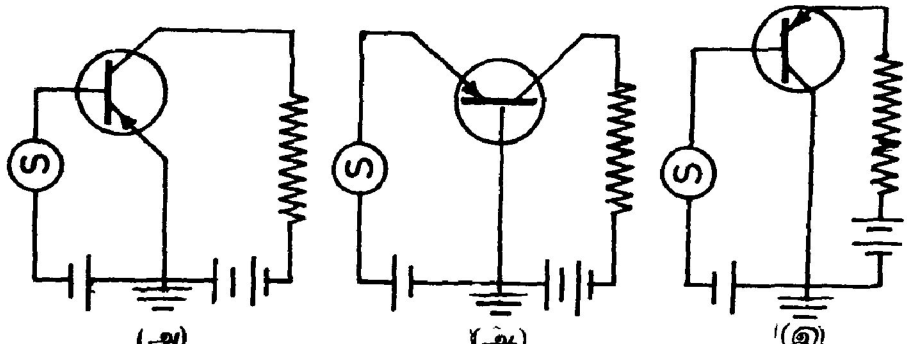
(2) பொது உமிழ்வாய் இணைப்பு மற்றும்

(3) பொது ஏற்புவாய் இணைப்பு ஆகும். வெவ்வேறு இணைப்புகளின் பண்புகளை அட்டவணை 10.1இல் காண்க. படம் 10.7 இல் டிரான்சிஸ்டர் இணைப்புச் சுற்றுகளின் எளிய மாதிரிகள் காண்பிக்கப்பட்டுள்ளன.

அட்டவணை 10.1

டிரான்சிஸ்டர் சுற்றுகளின் மூன்றுவகை இணைப்புகள்.

	பண்பு	பொதுஉமிழ்வாய்	பொதுஅடிவாய்	பொதுஏற்புவாய்
1.	டிரான்சிஸ்டர் மின்தடை			
	அ) வெளியீடு மின்தடை	ஏறத்தாழ 50 கிலோ ஓம் இருக்கும்.	1 மெகாஓமிலிருந்து 2 மெகா ஓம் வரை இருக்கும்.	100 ஓமிலிருந்து 1000 ஓம் வரை இருக்கும்.
	ஆ) உள்ளீடு மின்தடை	1 கிலோஓமிலிருந்து 2 கிலோஓம் வரை இருக்கும்.	20 ஓமிலிருந்து 50 ஓம்வரை இருக்கும்.	150 கிலோ ஓமிலிருந்து 600 கிலோஓம் வரை இருக்கும்.
2.	மின்னோட்டப் பெருக்குத்திறன்	அதிகமான மின்னோட்டப் பெருக்கம் (β). அதன் மதிப்பு 20லிருந்து 200 வரை இருக்கும்.	மின்னோட்டப் பெருக்கம் (α) ஏதும் இராது. அதன் மதிப்பு 0.85லிருந்து 0.995 வரை இருக்கும்.	மின்னோட்டப் பெருக்கம் (γ) மிக அதிகமாயிருக்கும். அதன் மதிப்பு 20ல் இருந்து 200 வரை இருக்கும்.
3.	மின்னழுத்தப் பெருக்குத் திறன்	அதிகமான மின்னழுத்தப் பெருக்கம் கிடைக்கும்.	அதிகமான மின்னழுத்தப் பெருக்கம் கிடைக்கும்.	மின்னழுத்தப் பெருக்கம் ஒன்றாகும்.
4	திறன் பெருக்குத் திறன்	மிக அதிகமான திறன் பெருக்கம் கிடைக்கும்	திறன் பெருக்கம் சுமாராயுள்ளது.	திறன் பெருக்கம் மற்றைய இணைப்புகளை விடக் குறைவு.
5.	உள்ளீடுக்கும் வெளியீடுக்கும் உள்ள கட்டவேறுபாடு.	180°.	0°.	0°.

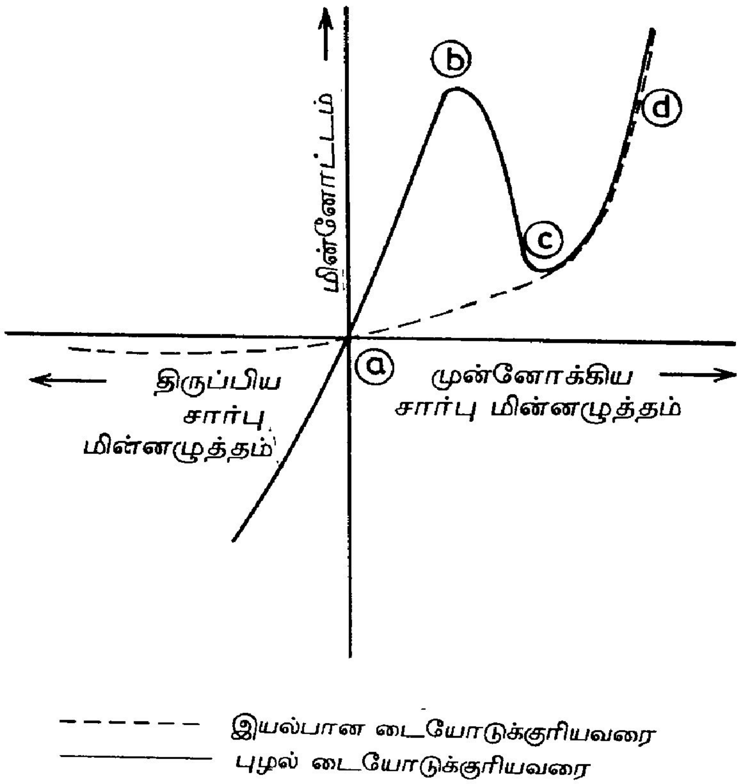


படம் 10.7 டிரான்சிஸ்டர் இணைப்புச் சுற்றுகளின் எளிய மாதிரிகள் (அ) பொது உமிழ்வாய் இணைப்பு (ஆ) பொது அடிவாய் இணைப்பு (இ) பொது ஏற்புவாய் இணைப்பு.

10.6 புழல் டையோடு (tunnel diode)

புழல்டையோடு என்பது ஒரு P–N சந்தியேயாகும். ஆனால், இதன் மின்னழுத்த-மின்னோட்டச் சிறப்பியல்வரையில் ஒருசிறிய எதிர்மின்தடை குணமுடையப் பகுதி இருக்கும். மேலும், P பகுதியிலும் N பகுதியிலும் முறையே ஏற்பு அணுக்களும் கொடையணுக்களும் மிக அதிகமான அளவில் (10^{25} அணுக்கள்/மீ^{3}) கலக்கப்பட்டுள்ளன. அதனால், மின்னழுத்தத் தடுப்பு மிகக்குறுகிய அளவில் (10^{-8} மீ) இருந்து அதன் மறு பக்கத்தில் காலியான ஆற்றல் மட்டங்கள் இருந்தால் மின்னூட்டக் கடத்திகள் மின்னழுத்தத் தடுப்பைத் துளைத்து (tunnelling)ச் செல்ல வாய்ப்புண்டு. புழல் டையோடுகள் 10^{-9} செகண்டுக்கும் குறைவான நேரத்தில் செயல்நிலையை எட்டும் இணைப்பிச் சுற்றுகளில் (switching circuits) மிகுந்த அளவு பயன்படுத்தப்படுகின்றன. மேற்கண்ட செயற்பாட்டினைப் புழல்டையோடால் மட்டுமே கொடுக்க முடியும். ஏனெனில், தடுப்புவழியே துளைத்துச்செல்வது ஒருவிரைவான செயலாகும். மேலும் இத்தகைய விரைந்து செயலாற்றும் திறனானது, எலெக்ட்ரான் அலை மின்னழுத்தத் தடுப்புவழியே ஏறத்தாழ ஒளிவேகத்தில் பரவுவதால் வருகிறது. இதனைக் கண்டுபிடித்தவர் இசாக்கி என்னும் ஜப்பானிய அறிவியல் மேதை ஆவார். அதனால், இதனை இசாக்கிடையோடு எனவும் அழைப்பர்.

படம் 10.8இல் புழல்டையோடின் மின்னழுத்த– மின்னோட்டச் சிறப்பியல்புவரை உள்ளது. அதே படத்தில் இயல்பான P–N சந்திக்குரிய வரையையும் தொடர்ச்சியில்லா கோட்டின்மூலம் காண்பிக்கப்பட்டுள்ளது. படத்தில் உள்ள வரையை மூன்று பகுதிகளாய்ப் பிரிக்கலாம். அஃதாவது, படத்தில் '*a*'யிலிருந்து '*b*'வரைக்கும் உள்ளபகுதி புழல்பகுதி எனவும், '*b*'யிலிருந்து '*c*'வரை உள்ள பகுதி எதிர்மின்தடைக் குணமுள்ள பகுதி எனவும், '*c*'யிலிருந்து '*d*'வரைக்கும் உள்ள பகுதி உட்புகுத்தப்பட்ட மின்னூட்டப்பகுதி அல்லது இயல்பான P–N சந்திப்பகுதி எனவும் அழைப்பர். குறிப்பாய் '*b*' என்னும்புள்ளி புழல் விளைவின் பெருமப்புள்ளி எனவும் '*c*' என்பது பள்ளத்தாக்குப் புள்ளி (valley point) எனவும் கூறுவர்.

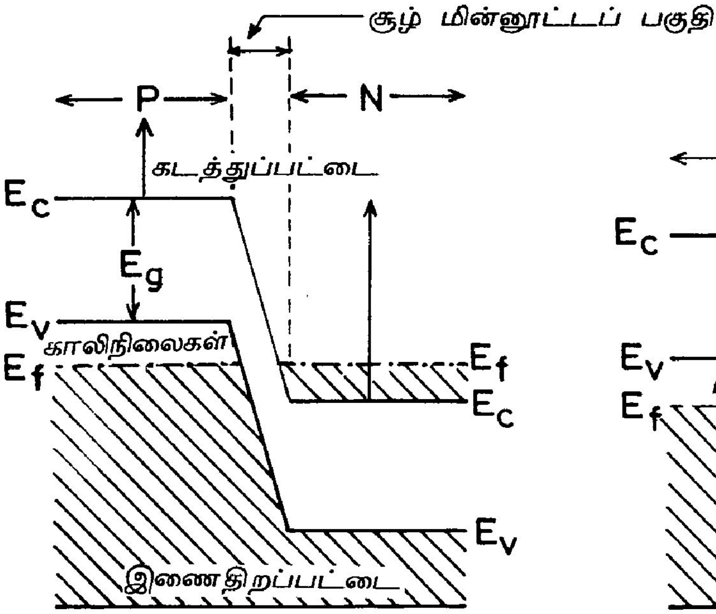


படம் 10.8 புழல் டையோடின் மின்னழுத்த-மின்னோட்டச் சிறப்பியல் வரை.

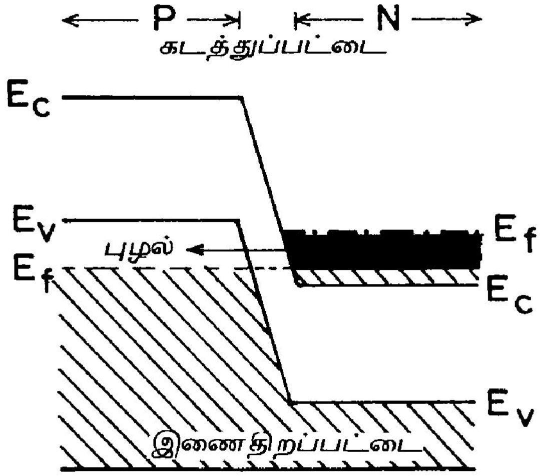
புழல் விளைவு :

குறைந்த ஆற்றல் பெற்ற எலெக்ட்ரான் போன்ற ஒருமின்னூட்டத்துகள் அதனைவிட உயர்ந்த மின்னழுத்தத் தடுப்பைத் துளைத்து உட்புகுந்து மறு பக்கத்தில் வெளிவர ஒருசிறிய, ஆனால், நிச்சயமான வாய்ப்பு உண்டென்று கவள எந்திரவியலில் கூறப்பட்டுள்ளது. உட்புகும் துகளின் ஆற்றலானது, மின்னழுத்தத்தடுப்பினுள் உட்புகுந்து மறு பக்கத்தில் வெளிவந்த பிறகும் மாறாமல், அதன் தொடக்க நிலை மதிப்பிலேயே இருக்கும். மின்னழுத்தத் தடுப்புவழியே துளைத்துச் செல்வதற்கான நிகழ்தகவு தடுப்பின் அகலத்தையும், தடுப்பின் உயரத்தையும் சார்ந்து அமையும். இவ்வாறு உயர்மின்னழுத்தத் தடுப்புகளைக் குறைவான ஆற்றலுடைய மின்னூட்டத் துகள்கள் துளைத்துச்செல்லும் செயலுக்குத்தான் புழல்விளைவு (tunnel effect) என்று பெயர்.

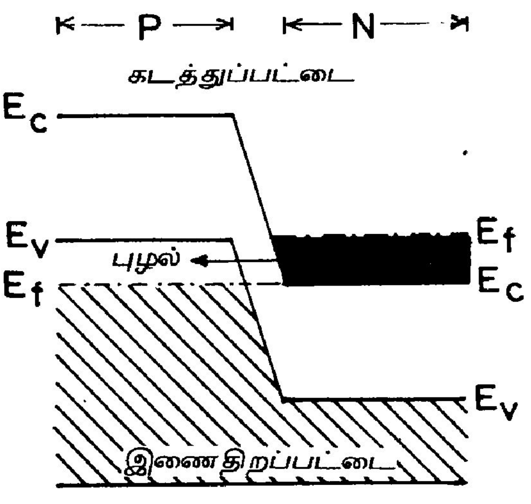
புழல்விளைவின்மூலம் புழல்டையோடு எவ்வாறு செயல்புரிகிறது என்பதனைத் தெளிவாகக் காண்போம். படம் 10.9 (அ)வில் ஒருபுழல் டையோடில் சார்பு மின்னழுத்தம் ஏதும் கொடுக்கப்படாதபோதுள்ள அதன் ஆற்றல் மட்டங்களைக் காட்டப்பட்டுள்ளது.



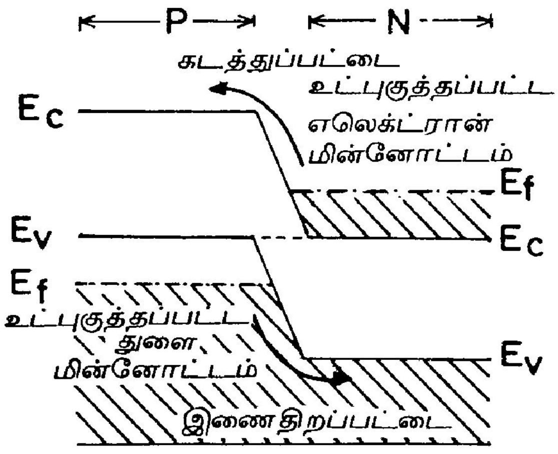
(அ) சார்பு மின்னழுத்தம் இல்லாதபோது புழல் டையோடின் ஆற்றல்பட்டைகளின் அமைப்பு



(ஆ) முன்னோக்கிய சார்புமின்னழுத்தம் சிறிது கொடுக்கப்பட்டவுடன் புழல் விளைவு ஏற்படுதல்



(இ) புழல் விளைவின் பெருமநிலை



(ஈ) புழல் டையோடில் புழல்விளைவு மின்னோட்டம்சுழியாகி, இயல்பாய மின்னோட்டம் ஏற்படுதல்.

படம் 10.9 : புழல் டையோடின் ஆற்றல் பட்டைகள்.

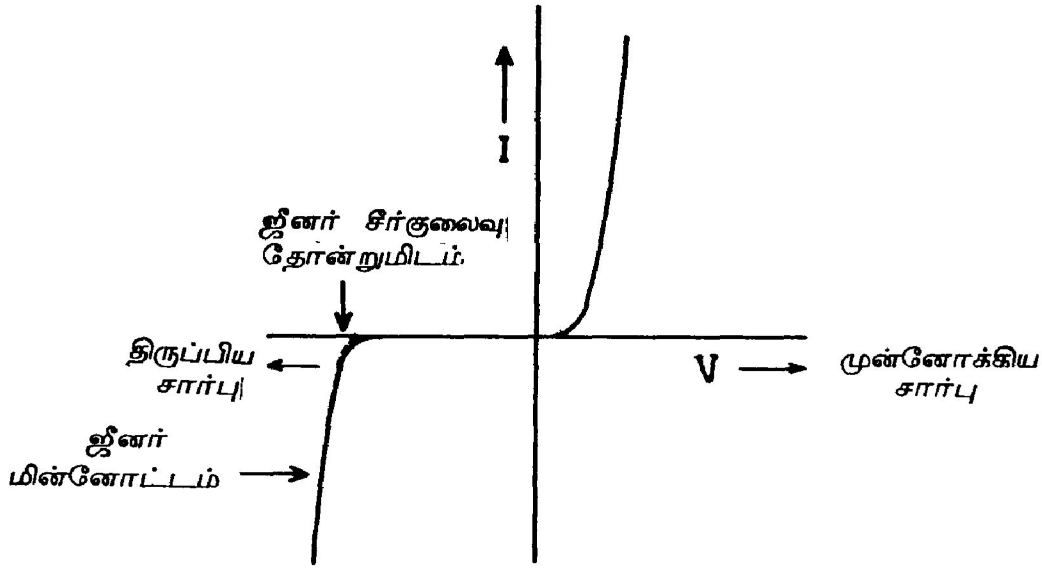
இதில் இரண்டு திசைகளிலும் சமஎண்ணிக்கையுள்ள எலெக்ட்ரான்கள் எதிர்எதிரே துளைத்துச் சென்று கொண்டிருக்கும். அதனால், மொத்த மின்னோட்டம் சுழியாயிருக்கும். இதனைப் படம் 10.8இல்'*a*' என்ற புள்ளியில் காண்பிக்கப்பட்டுள்ளது. முன்னோக்கிய சார்பு மின்னழுத்தம் ஒருவோல்ட்டுக்கும் குறைவாகக் கொடுக்கப்பட்டால் '*N*' பகுதியிலிருந்து '*P*' பகுதிக்கு ஏராளமான எலெக்ட்ரான்கள் துளைத்துச்செல்லும். ஆனால், எதிர்திசையில் துளைத்துச் செல்லும் எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை மிகக் குறைவாகவேயிருக்கும். அதனால் சந்தியில் அதிக மின்னோட்டம் தோன்றுகிறது. முன்னோக்கிய சார்பு மின்னழுத்தத்தின் மதிப்பு உயர உயர '*N*' பகுதியில் இருக்கும் கடத்துப் பட்டையும் '*P*' பகுதியிலிருக்கும் இணைதிறப் பட்டையும் பெருமளவிற்கு ஒன்றோடுஒன்று மேற்பொருந்தும்வரை இந்த எலெக்ட்ரான் மின்னோட்டம் மிக்க அளவில் இருக்கும்.

படம் 10.9 (இ)யில் புழல்விளைவினால் ஏற்படும் மிக்க மின்னோட்டத்தின் போது புழல்டையோடின் ஆற்றல் மட்டங்கள் எவ்வாறு இருக்கும் என்பது காண்பிக்கப்பட்டுள்ளது. பெரும நிலையில் '*N*' பகுதியில் உள்ள ஃபெர்மி மட்டம் '*P*' பகுதியில் உள்ள இணைதிறப் பட்டையின் மேல்மட்டத்திற்குச் சரியாயிருக்கும், '*P*' பகுதியில் உள்ள ஃபெர்மிமட்டம் '*N*' பகுதியில் உள்ள கடத்துப் பட்டையின் அடிமட்டத்திற்குச் சரியாயமையும். புழல் டையோடில் புழல் விளைவால் ஏற்படும் பெருமமின்னோட்டத்தைப் படம் 10.8இல் '*b*' என்ற புள்ளியால் காண்பிக்கப்பட்டுள்ளது. முன்னோக்கிய சார்பு மின்னழுத்தம் இதற்கு மேலும் உயர்த்தப்பட்டால் பயன்படக்கூடிய மேற்பொருந்துதல் (useful overlapping) குறைந்து முன்னோக்கிய திசையில் துளைத்துச் செல்லும் மின்னோட்டம் குறைந்து விடும். ஏனெனில், துளைத்துவரும் எலெக்ட்ரான்கள் அமர்தற்குக் காலியான ஆற்றல் மட்டங்கள் ஆற்றல் இடைவெளியில் ஏதும் இல்லை. இதனால், புழல் விளைவு குறைகிறது. அதனால், மின்னழுத்தம் கூடினாலும் மின்னோட்டம் குறைந்துகொண்டே போகிறது. அதனால்தான் இப்பகுதியை எதிர்மின்தடைப் பகுதி (nagative resistance region) எனக் கூறுகிறோம்.

படம் 10.8இல் '*b*'யிலிருந்து '*c*' வரை உள்ள பகுதி எதிர்மின்தடைக்குணமுள்ள பகுதியாகும். இறுதியாய் '*N*' பகுதியின் கடத்துப் பட்டையின் அடிமட்டமும் '*P*' பகுதியின் இணைதிறப் பட்டையின் மேல்மட்டமும் ஒரே மின்னழுத்தத்திற்கு வரும்போது ஆற்றல் மட்டங்களின் மேற்பொருந்தலே இராது. இதனால், துளைத்துச் செல்லும் மின்னோட்டம் சுழியாகிவிடும். இத்தனைப் படம் 10.9 (ஈ)இல் காண்பிக்கப்பட்டுள்ளது. மேலும், இதனைப் படம் 10.8இல் '*c*' என்ற புள்ளியிலும் காண்பிக்கப்பட்டுள்ளது. முன்னோக்கிய சார்பு மின்னழுத்தம் இன்னும் உயர்த்தப்பட்டால் துளைத்துச் செல்லும் மின்னோட்டம் சுழியாயிருந்தாலும், வழக்கமான *P–N* சந்தியில் ஓடும் உட்புகுத்தப்பட்ட மின்னூட்டக் கடத்திகளின் மின்னோட்டம் ஓடத் தொடங்கும். இது '*P*' பகுதியிலிருந்து '*N*' பகுதிக்கு உட்புகுத்தப்பட்ட துளைகளினாலும் '*N*' பகுதியிலிருந்து '*P*' பகுதிக்கு உட்புகுத்தப்பட்ட (injected) எலெக்ட்ரான்களினாலும் தோன்றும் மின்னோட்டம் ஆகும். புழல்டையோடு விரைந்து செயல்படும் இணைப்பியாய் மட்டுமின்றி மின்பெருக்கியாயும்,

மின் அலைஇயற்றியாயும் பயன்படுகிறது. மின் அலைஇயற்றிச் சுற்றில் எதிர்மின்தடையாய் புழல்டையோடு பயன்படுத்தப் படுகிறது. பொதுவாய் இணைப்பி, மின் பெருக்கி, அலைஇயற்றி ஆகியவற்றின் சுற்றுகளில் புழல்டையோடின் எதிர்மின்தடைக்குணமுள்ள பகுதி மிகுதியாய்ப் பயன்படுத்தப்படுகிறது.

10.7 ஜீனர் டையோடு

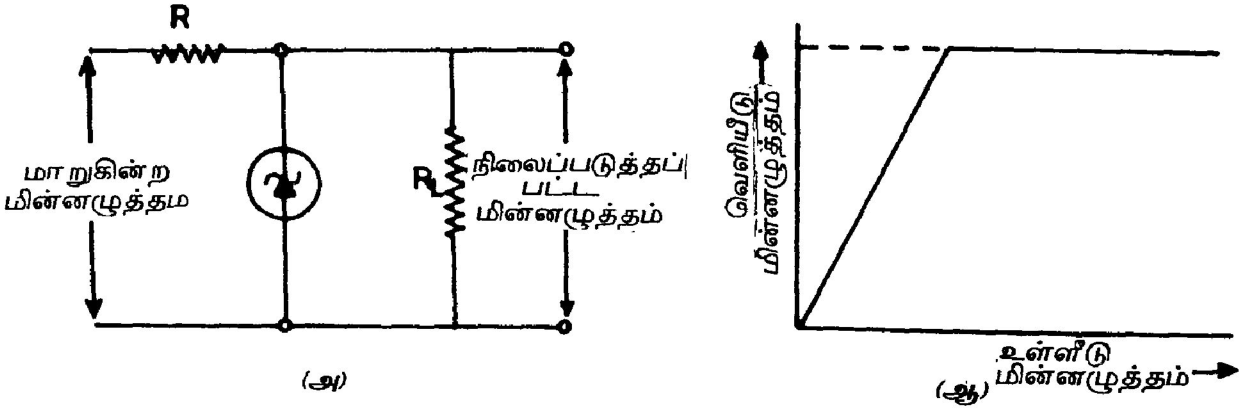


படம் 10.10 ஜீனர் டையோடின் மின்னழுத்த – மின்னோட்டச் சிறப்பியல் வரை.

ஜீனர் சீர்குலைவு $P-N$ சந்தியின் வற்றிய பகுதியில் ஏற்படும் ஏராளமான மின்புலத்தினால் தோன்றும் எலெக்ட்ரான்கள், துளைகளினால் வருகிறது. இந்த ஏராளமான மின்னூட்டக் கடத்திகளின் தோற்றத்தால் $P-N$ சந்தி திருப்பிய சார்பு மின்னழுத்தத்தில் இருந்தாலும் திடீரென்று மிகப் பெருமளவான மின்னோட்டம் டையோடில் ஓடத்தொடங்கும். இதுதான் ஜீனர் சீர்குலைவு எனப்படுகிறது. இந்நிலையில் டையோடு திருப்பிய சார்பு மின்னழுத்தத்தில் இருந்தாலும் அதன் மின்தடை மிகக் குறைவானதாய் இருக்கும். எனவே ஜீனர் டையோடு என்பது ஜீனர் சீர்குலைவுப் பகுதியில் செயற்புரியும் ஒரு $P-N$ சந்திடையோடு ஆகும். எல்லா ஜீனர் டையோடுகளும் சிலிக்கான் $P-N$ சந்தியால் ஆனவை. அவற்றில் ஜீனர் சீர்குலைவுக்குத் தேவையான மின்னழுத்தம் மிகத் துல்லியமாய் இருக்கும். 'P' பகுதி, 'N' பகுதியில்உள்ள வேற்றுப்பொருள் அணுக்கள்மிகுதியான அளவில் கலக்கப்பட்டிருப்பதுடன் சந்தியின் வற்றியபகுதியின் அகலம் மிகவும் மெல்லியதாயிருக்கும். இதனாலேயே திருப்பிய சார்பு மின்னழுத்தம் மிகக்குறைவானதாயிருந்தாலும் அதிக ஆற்றல் வாய்ந்த மின்புலம் (10^7 வோல்ட்/மீட்டர்) தோன்றுகிறது. படம் 10.10இல் ஜீனர் டையோடினுடைய மின்னழுத்த-மின்னோட்டச் சிறப்பியல் வரை வரையப்பட்டுள்ளது. படத்தில் ஜீனர் சீர்குலைவு மின்னழுத்தம் திருப்பிய சார்பில் கொடுக்கப்பட்டவுடன் ஏராளமான

மின்னூட்டக் கடத்திகள் தோன்றி, மின்னோட்டம் சந்தியில் மிகுதியாய்ப் பாய்கிறது. அதனால், இப்பகுதியில் அச்சிறப்பியல்வரை, ஏறத்தாழ ஒருகுத்துக்கோடு போல் உள்ளது. இக்குணமே மின்னழுத்த நிலைத்தன்மை (stability) ஏற்படுத்தப்பயன்படுகிறது.

மின்னழுத்தச் சீர்தூக்கி (voltage regulator)



படம் 10.11 (அ) மின்னழுத்தச் சீர்தூக்கிச் சுற்று.
(ஆ) ஜீனர் டையோடின் உள்ளீடு, வெளியீடு மின்னழுத்தச் சிறப்பியல்வரை.

படம் 10.11 (அ)வில் ஓர்எளிய மின்னழுத்தச் சீர்தூக்கி சுற்றுக் காண்பிக்கப்பட்டுள்ளது. இதில் ஜீனர் டையோடின் சீர்குலைவு மின்னழுத்தம் நமக்கு வேண்டிய நிலைப்படுத்தப்பட்ட வெளியீடு மின்னழுத்தத்திற்குச் சமமாயுள்ளது. உள்ளீடு மின்னழுத்தம் சீர்குலைவு மின்னழுத்தத்திற்குக் குறைவாயிருக்கும்போது மிகக்குறைந்த அளவு மின்னோட்டம் பாய்கிறது. ஏனெனில், ஜீனர் டையோடு திருப்பிய சார்பில் உள்ளது. அதனால், உள்ளீடு மின்னழுத்தம் அனைத்தும் வெளியீடு சுற்றில்தோன்றுகிறது. ஆனால், உள்ளீடு மின்னழுத்தம் சீர்குலைவு மின்னழுத்தத்திற்குச் சமமாகும் போது சீர்குலைவு உண்டாகிறது. அதனால், டையோடில் செல்லும் மின்னோட்டம் ஒருநிலைப்படுத்தப்படுவதால் டையோடின் வெளியீடு சுற்றில் மின்னழுத்தம் ஒரு மாறிலியாய்வரும். இதனைப் படம் 10.11 (ஆ) காண்பிக்கிறது.

10.8 வெப்பமின்தடை (thermistor)

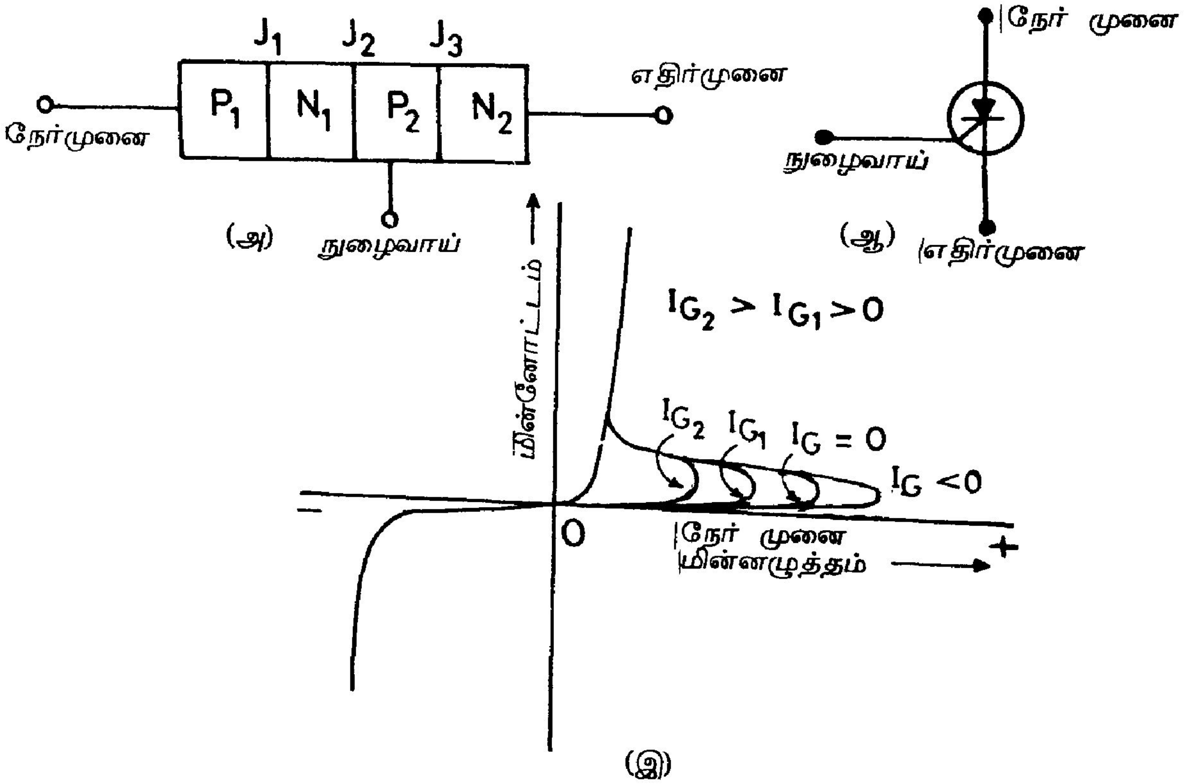
எல்லாக் குறைகடத்திகளிலும் மின்கடத்துந்திறன் வெப்பநிலையைச் சார்ந்துள்ளது. இக் குணத்தைப் பயன்படுத்தியே வெப்பமின்தடை தயாரிக்கப்படுகிறது. இது வெப்பநிலை மாறுபாட்டை மிகத்துல்லியமாக எடுத்துக் காட்டும் பண்பு கொண்ட ஒரு குறைகடத்தியால் செய்யப்பட்ட மின்தடையாகும். பொதுவாகக் குறைகடத்திகளில் வெப்பமின்தடைக்குணகம் எதிர்மதிப்பு உடையதாயிருக்கும். ஆனால், மிகுதியாய் வேற்று உலோக அணுக்கள் கலக்கப்பட்ட குறைகடத்தியில் நேர்க்குறியுடைய வெப்ப மின்தடைக்குணகத்தைத் தோற்றுவிக்கலாம். அப்பொருள் குறைகடத்தியாய்ப் பெயரளவில் இருந்தாலும் அதில் உலோகக் குணங்கள் நிறைந்திருக்கும். குறிப்பாக வெப்பநிலை உயர்வினால் அதன் மின்தடையும் உயரும். ஏனெனில், அதிலுள்ள மின்னூட்டக்

கடத்திகளின் நகர்வு திறன் மிகுந்த அளவில் குறைகிறது. சென்சிஸ்டர் (டெக்ஸாஸ் இன்ஸ்ட்ருமெண்ட்ஸால் தயாரிக்கப்பட்டது) என்பது அவ்வகையைச் சார்ந்த வெப்ப மின்தடையாகும். அதன் வெப்ப மின்தடைக்குணகம் (வெப்பநிலை $-60°C$யிலிருந்து $+150°C$ வரை $+0.7/°C$ என்னும் மதிப்பில் உள்ளது. பெரும்பாலும் மாங்கனீசு, மக்னீசியம், கோபால்ட், நிக்கல் ஆகியவற்றின் ஆக்ஸைடுகள் ஒன்றாகக் கலக்கப்பட்டு இவற்றிலிருந்து குறைகடத்திப் பொருள்கள் தயாரிக்கப்படுகின்றன. இக்குறைகடத்திப் பொருள்களைப் பயன்படுத்தி வெப்ப மின்தடைகள் தயாரிக்கப்படுகின்றன. சிறிய கட்டை, மணி, பாளம், பொருத்தி வளையம், தட்டு போன்ற பல உருவங்களில் தேவைக்கேற்ற விதத்தில் இவை தயாரிக்கப்படுகின்றன. சிலிக்கான் வெப்ப மின்தடைகள் டிரான்சிஸ்டர் சுற்றுகளில் வெப்பநிலையைச் சமன்படுத்துதற்குப் பயன்படுத்தப்படுகின்றன. மேலும், வெப்ப மின்தடை வெப்பநிலையை அளப்பதற்கும், வெப்பப்படுத்துவதைக் கட்டுப்படுத்துவதற்கும் பயன்படுத்தப்படுகிறது. மேலும், இவை வெற்றிட அளவீடுகளிலும், நேரம் தாழ்த்துந் சுற்றுகளிலும் (delay line circuits), திரவங்களும் வாயுக்களும் இயங்கும் போது அவற்றின் ஓட்டத்தையும், வேகத்தையும் கணக்கிடவும் பயன்படுகின்றன.

10.9 சிலிக்கான் கட்டுண்ட அலைதிருத்திகள் (silicon controlled rectifiers) அல்லது தைரிஸ்டர்கள் (thyristors)

ஒரு தைரிஸ்டர் என்பது தைராட்ரான் வெற்றிடக் குழலுக்கு (thyratron vacuum tube)ச் சமமானத் திண்மநிலையில் உள்ள ஒருகருவியாகும். செயலிலும், மின்வாய்கள் அமைப்பிலும் இது தைராட்டிரானைப் போல் இருப்பதால் இதனை தைரிஸ்டர் எனக்கூறுகிறோம். இது $P-N-P-N$ என்னும் நான்கு பகுதிகள் உள்ள சிலிக்கான் சந்திக் கருவியாகும். இதனைக்கட்டுண்டச் சிலிக்கான் திருத்தி (silicon controlled rectifier) அல்லது சுருக்கமாய் எஸ் சி ஆர் (SCR) எனவும் அழைப்பர். ஒரு தைரிஸ்டர் என்பது ஒரே சமயத்தில் அலைதிருத்தியாயும், பளுவிற்கு அளிக்கப்படும் திறனைக் கட்டுப்படுத்தும் கருவியாயும் செயற்படும் கருவியாகும். மேலும் அது மில்லி ஆம்பியர் மின்னோட்டத்திலிருந்து நூறு ஆம்பியர் மின்னோட்டம் வரை உருவாக்கும் திறனுள்ளது. அதை ஒரு டிரான்சிஸ்டர் மற்றும் அலைதிருத்தி டையோடு சேர்ந்த அமைப்பு எனக் கூறலாம். ஒரு சிலிக்கான் 'N' வகைப்பாளத்தில் ஏற்பு அணுக்களைக் கொண்டு இரண்டு சந்திகளை உருக்கி, ஒட்டுவதனால் இஃது உருவாக்கப்படுகிறது (படம் 10.12ஐப் பார்க்க). நேர்முனையில் மின்கலஅடுக்கின் எதிரையும், எதிர்முனையில் அதன் நேரையும் இணைத்தால் சந்திகள் J_1, J_3 ஆகியவை திருப்பிய சார்பிலும், சந்தி J_2 முன்னோக்கிய சார்பிலும் இருக்கும். அதனால் இதன் நுழைவாயில் (gate) எவ்வித மின்னழுத்தம் இருந்தாலும் ஒரு திருப்பிய சார்பு மின்னழுத்தம் உள்ள டையோடாகவே செயல்படும். ஆனால், நேர்முனையில் மின்கல அடுக்கின் நேரையும், எதிர்முனையில் அதன் எதிரையும் இணைத்தால் சந்திகள் J_1, J_3 ஆகியவை முன்னோக்கிய சார்பிலும், சந்தி J_2 திருப்பிய சார்பிலும் இருக்கும். இந்நிலையிலும் இக்கருவி மின்கடத்தா நிலையிலேயே உள்ளது. ஆனாலும், இதனை மின்கடத்தும் நிலைக்கு கொண்டுவர எதிர்முனையுடன் ஒப்பிடும்போது நுழைவாய் நேர்மின்னழுத்தம் உடையதாகுமாறு செய்ய வேண்டும்.

இந்நேர்மின்னழுத்தம் பெற்ற நுழைவாய், திருப்பிய சார்பில் உள்ள J_2 சந்தியில் சீர்குலைவை உண்டாக்கி, எல்லா மூன்று சந்திகளும் முன்னோக்கிய சார்பு உடையதாய் மாற்றுகிறது. அதனால், இக் கருவி மின்கடத்தும் நிலையை அடைகிறது. கருவி மின்கடத்தும்நிலைக்கு வந்தவுடன் நுழைவாயில் மின்னழுத்தத்திற்கு செயல்திறன் இல்லாமல் போய்விடும். இந்நிலையில் மின்னோட்டம் I ஆனது கொடுக்கப்படும் மின்இயக்கு விசையாலும் வெளிச் சுற்றினாலும் கட்டுப்படுத்தப்படும். நுழைவாய் மின்னழுத்தத்தைச் சுழியாக்கினாற் கூட இவ்வலைத்திருத்தியைச் செயற்படாநிலைக்குக்கொண்டுவர முடியாது. இதனைச் செயற்படாநிலைக்குக் கொண்டுவர நேர்முனையில் மின்னழுத்தத்தைக் குறைக்க வேண்டும். இவ்வாறு செயற்படுமுறையானது



படம் 10.12 கட்டுண்டச் சிலிக்கான் திருத்தி (அ) நான்கு பகுதிகள் கொண்ட எஸ்சிஆர். (ஆ) சுற்றில் எஸ்சிஆரின் இடுகுறி (இ) எஸ்சிஆரின் சிறப்பியல்வரை.

வெற்றிடக்குழல்வகைத் தைராட்டிரானை ஒத்தியிருக்கிறது. அதிலுள்ள கிரிடு, இக் கருவியிலுள்ள நுழைவாய்போல் செயல்படுகிறது. மேலும் சந்தி J_2இல் ஏற்படும் சீர்குலைவு தைராட்டிரானில் அதிக மின்னோட்டம் ஏற்படக்காரணமாயிருக்கும் எரியூட்டு நிகழ்ச்சியை (firing phenomenon) ஒத்திருக்கிறது. மாதிரிக்காக எஸ்சிஆர்–இன் சிறப்பியல்புகள் படம் 10.12 (இ)யில் காட்டப்பட்டுள்ளன. இதில் வெவ்வேறு நான்கு நுழைவாய் மின்னோட்டங்களுக்கு எஸ்சிஆரின் மின்னோட்ட அளவு நேர்முனை மின்னழுத்தத்தோடு எவ்வாறு மாறுபடுகிறது என்பது காட்டப்பட்டுள்ளது. தைரிஸ்டர்கள்

நேர்மின்னழுத்தத் திறன்அளிப்புகளிலும் (d. c. power supplies), திறன் இணைப்பிக் கருவிகளிலும் பயன்படுகின்றன.

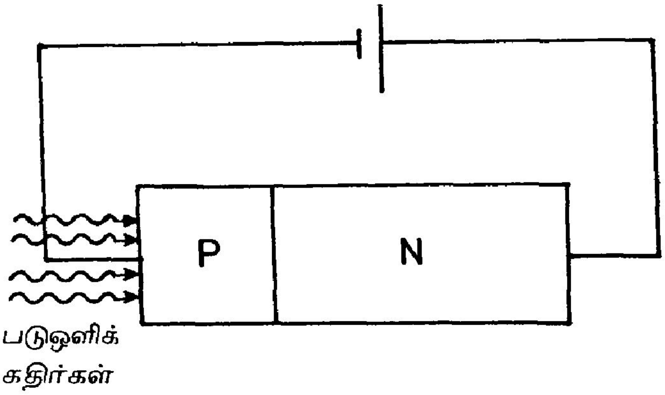
10.10 $P-N$ சந்தியில் ஒளியால் ஏற்படும் விளைவுகளும், அவற்றின் பயன்களும்

கவளக் கொள்கையின்படி ஒளி என்பது ஒருமின்காந்தக்கதிர்வீச்சு ஆகும். அதில் "போட்டான்கள்" என்ற ஆற்றல்கூறுகள் உள்ளன. ஒவ்வொரு போட்டானும், ஒரு குறிப்பிட்ட அளவு ஆற்றல் $h\nu$வைக் கொண்டிருக்கும். இதில் ν என்பது கதிர்வீச்சின் அதிர்வெண்; 'h' என்பது பிளாங்க்மாறிலி. ஒருகுறைகடத்திப் பொருளின் புறப்பரப்பின் மீது ஒளிவிழுமானால் அதன் ஆற்றலின் ஒருபகுதி குறைகடத்திப் பொருளால் உட்கொள்ளப்படும். அவ்வாறு உட்கொள்ளப்படும்போது இரு நிகழ்வுகள் நிகழலாம். அஃதாவது, உட்கொள்ளப்பட்ட போட்டானின் ஆற்றல் குறைகடத்தியின் ஆற்றல் இடைவெளி E_gயை விடக் குறைவாயிருக்குமானால் அப்போட்டானை ஒரு போனான் உட்கொண்டு குறைகடத்தியை வெப்பப்படுத்தும். ஆனால், அப்போட்டானின் ஆற்றல் குறைகடத்தியின் ஆற்றல் இடைவெளி E_gக்குச் சமமாகவோ, மிகுதியாகவோ இருக்குமானால் உட்கொள்ளப்பட்ட போட்டானை இணைதிறன் பட்டையிலுள்ள எலெக்ட்ரான் உட்கவர்ந்து கடத்துப்பட்டைக்குச் சென்றுவிடும். அதனால் ஓர்எலெக்ட்ரான்-துளை இரட்டைத் தோற்றுவிக்கப்படுகிறது. அதனால் E_gயை விட மிகுதியான ஆற்றலுடைய போட்டான்கள் உட்கொள்ளப்படுவதால் இணைதிற எலெக்ட்ரான்கள் கிளர்ச்சியுற்றுக் கடத்துப்பட்டைக்குச் சென்று விடுகின்றன. இதனால், மிகுதியான எலெக்ட்ரான்–துளை இரட்டைகள் தோற்றுவிக்கப்படுகின்றன. குறைகடத்தியின் மின்கடத்துந்திறன் மிகுதியாகிறது. ஆனால், ஒளிக்கதிர் வீச்சால் ஏற்படும் சிறுபான்மை மின்னூட்டக் கடத்திகளின் எண்ணிக்கை, வெப்பவிளைவால் ஏற்படும் பெரும்பான்மை மின்னூட்டக் கடத்திகளின் எண்ணிக்கையைவிட மிக அதிகமாயிருக்கும். அதனால், குறைகடத்திகளில் மின் கடத்துந்திறன் ஒளிக்கதிர்வீச்சால் கூடுவதற்குக் காரணம் உட்செலுத்தப்பட்ட (injected) சிறுபான்மை மின்னூட்டக் கடத்திகளாகும். இந்த நிகழ்ச்சியை ஒளிக்கடத்தல் (photoconductivity) என்று கூறுகிறோம். $P-N$ சந்தியில் ஒளியால் மின்னூட்டக் கடத்திகளின் செறிவினைக் கூட்டமுடிவதால் சந்தியை ஒளிக்கடத்து மின்கலமாயும் (photoconductive cell), சூரிய ஒளி மின்கலமாயும் (solar cell) பயன்படுத்தலாம்.

ஒளிக்கடத்து மின்கலம் (photoconductive cell) :

ஒளிடையோடு அல்லது ஒளிக்கடத்து மின்கலத்தின் ஒளிபடும் பகுதியாயுள்ள 'P' பகுதி மிக மெல்லியதாயுள்ளது. அதனால், அதன் புறப்பரப்பில் தோற்றுவிக்கப்படுகின்ற எலெக்ட்ரான்- துளை இரட்டைகள் விரவல் முறையால் ஒன்றிடல் ஏதுமில்லாது சந்திக்கு வரமுடியும். குறிப்பாகச் சந்தி, திருப்பிய சார்பில் இருக்கும் (படம் 10.13). அதனால், சந்திக்கு வந்த சிறுபான்மை மின்னூட்டக் கடத்திகளுக்குத் தடுப்பு ஏதுமில்லாது இருப்பதால் அவை சந்தியை எளிதாகக் கடந்து விடுகின்றன. மேலும், திருப்பிய சார்பில் உள்ள $P-N$ சந்தியில் ஒளிபடாதபொழுது அதன் மின்தடை மெகாஓம் என இருக்கும். ஆகையால், ஒளிபட்டவுடன் ஏராளமாகத் தோன்றும் சிறுபான்மை மின்னூட்டக் கடத்திகளான எலெக்ட்ரான், துளை ஆகியவற்றால் திருப்பிய தெவிட்டு மின்னோட்டம்

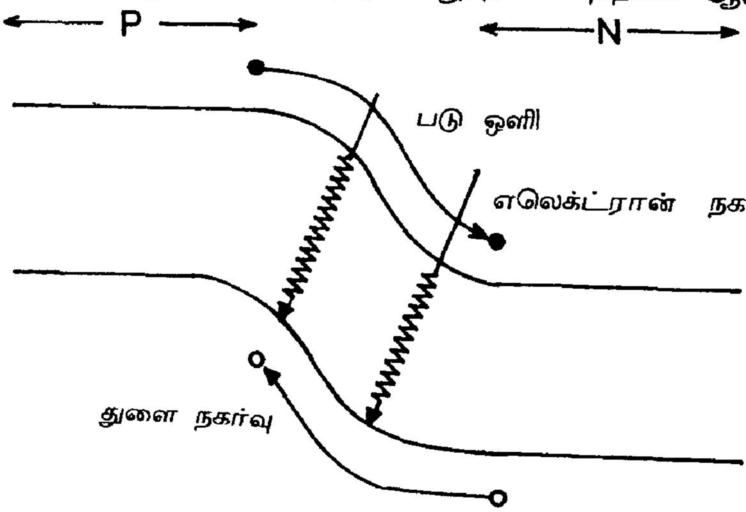
மிக அதிக அளவில் கூடுகிறது. அதனால், திருப்பிய சார்பில் மின்கடத்துந்திறனும் மிக அதிக அளவில் உயரும். அதனால் படுகதிர் வீச்சின் செறிவினைத் துல்லியமாய் ஒளிக்கடத்துமின்கலத்தைப் பயன்படுத்தி அளக்கலாம். மேலும், இதனை இணைப்பியாயும் பயன்படுத்தலாம்.



படம் 10.13 ஒளிடையோடு அல்லது ஒளிக்கடத்து மின்கலம் செயற்படும் விதம்.

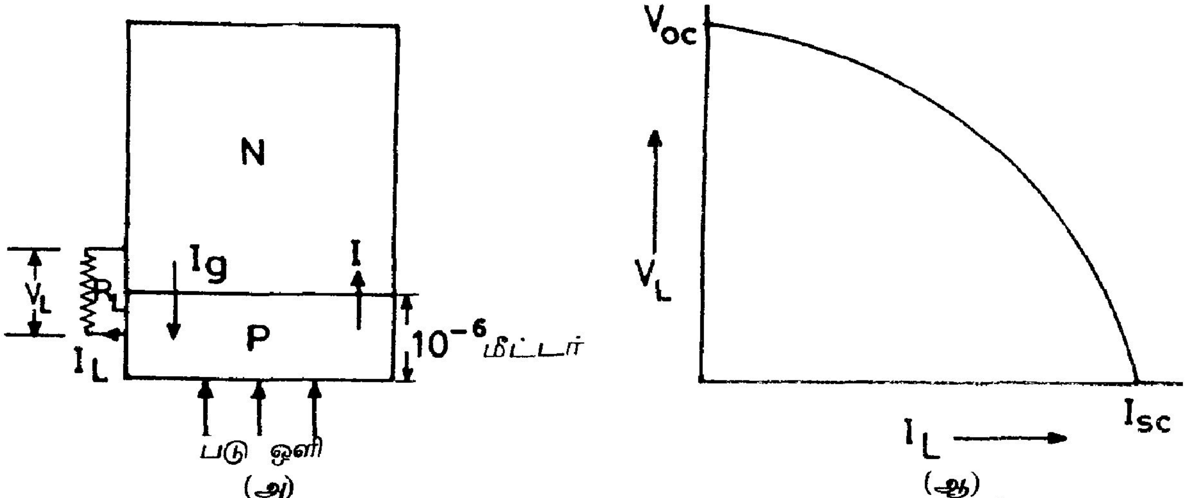
சூரிய ஒளி மின்கலம் அல்லது ஒளி மின்னழுத்த மின்கலம் (solar cell (or) photovoltaic cell):

சூரியஒளி மின்கலம் மேலே கூறப்பட்ட ஒளிக்கடத்து மின்கலம் போல் செயல்படுகிறது. ஆனால், இங்குத் திருப்பிய சார்பு மின்னழுத்தம் கொடுக்கப்பட வேண்டுவதில்லை. ஏனெனில், சூரிய ஒளி மின்கலமே ஒரு மின்னழுத்தத்தைத் தோற்றுவிக்கிறது. இவ்வாறு பல சூரியஒளி மின்கலங்களை வரிசையாய் இணைத்து, மின்கலஅடுக்கு (battery) ஒன்றனை உருவாக்கலாம். ஆகவே, சூரியஒளி மின்கல அடுக்குகள் ஒளி ஆற்றலை மின் ஆற்றலாய் மாற்றும் ஆற்றல் மாற்றிகள் ஆகும்.



படம் 10.14 சூரிய ஒளி மின்கலம் செயற்படும் விதம்.

ஒளிக்கதிர்வீச்சு $P-N$ சந்தியில்படும்போது எலெக்ட்ரான்-துளை இரட்டைகள் தோற்றுவிக்கப்படுகின்றன என்பது நாம் அறிந்ததே. ஆனால், வெளிமின்னழுத்தம் ஏதுமில்லாத போது $P-N$ சந்தியிலுள்ள தடுப்பு மின்னழுத்தத்தால் அவற்றை எலெக்ட்ரான், துளை என இருவேறாகப் பிரித்து, தனித்தனியே சேகரிக்க முடியும். இம் மிகுதியான மின்னூட்டக் கடத்திகள் வெளிச்சுற்றில் செல்லும்போது ஒருமின்னோட்டத்தைத் தோற்றுவிக்கின்றன. மின்னோட்டம் வெளிச்சுற்றில் பாய்வதால் அதில் மின்னழுத்த வேறுபாடு நிச்சமாயிருக்கவேண்டும். இந்நிகழ்ச்சியையே ஒளிமின்னழுத்த விளைவு (photovoltaic effect) என்று கூறுகிறோம்.



படம் 10.15 (அ) சூரிய மின்கலத்திலுள்ள பல்வேறு மின்னோட்டங்கள் பாயும் திசைகள்

(ஆ) சூரியமின்கலத்தின் மின்னழுத்த – மின்னோட்டச் சிறப்பியல்புவரை. I_{SC} –குறுக்கிணைக்கப்பட்டசுற்று மின்னோட்டம்; V_{OC} –திறந்த சுற்று மின்னழுத்தம்.

ஒளிபடும்போது சந்தியில் தோன்றும் மின்னியக்கு விசையே ஒளி மின்னழுத்த விளைவு ஆகும். இதனை ஆதாரமாய் வைத்துச்சூரிய மின்கலங்கள் தயார் செய்யப்படுகின்றன. ஜெமினி போன்ற துணைக்கோள்களில் இவைகள் மின் ஆற்றல் தோற்றுவிக்கும் மூலங்களாய் (sources)ப் பயன்பட்டன. பெரும்பாலும் சூரிய மின்கல அடுக்குகள் உற்பத்தி செய்தற்குச் சிலிக்கானே மிகுதியாய்ப்பயன்படுகின்றன. ஏனெனில், அதன் ஆற்றல் இடைவெளி சூரிய ஒளியில் அதிகசெறிவுள்ள ஒருகுறிப்பிட்ட அலைநீளமுடைய போட்டான்களின் ஆற்றலுக்குச் சமமாயுள்ளது. அதனால் சூரிய ஒளி போட்டான்களைச் சிலிக்கானால் மிகுதியாய் உட்கவர்ந்து மிகுதியான எலெக்ட்ரான்-துளை இரட்டைகளைத் தோற்றுவிக்க முடியும். சூரிய ஒளி மின்கலங்கள், தானியங்கு புகைப்படக் கருவிகளில் (automatic cameras) ஒளியின் செறிவைக் கண்டுபிடிக்கவும் பயன்படுகின்றன.

சூரிய ஒளி மின்கலம் எவ்வாறு செயல்படுகிறது என்பதனைச் சிறிது காண்போம். துளைகளும், எலெக்ட்ரான்களும் சந்தியில் தோன்ற அவை சந்தியில் உள்ள தடுப்பு

மின்னழுத்தத்தால் முறையே 'P' பகுதிக்கும் 'N' பகுதிக்கும் தள்ளப்படுகின்றன. இவற்றின் இயக்கத்தால் தோன்றும் மின்னோட்டம் 'I_g' ஆகும். இதனால், வெளிச்சுற்று இணைப்பு ஏதுமில்லாதபோது 'P' பகுதியில் நேர்மின்னேற்றம் பெற்ற மின்னூட்டங்களும் 'N' பகுதியில் எதிர்மின்னேற்றம் பெற்ற மின்னூட்டங்களும் சேகரிக்கப்பட்டிருக்கும். இவ்வாறு சேகரிக்கப்பட்ட மின்னூட்டங்களே P–N சந்தியை ஒருமுன்னோக்கிய சார்பில் இருப்பது போல் ஆக்கி, ஒருமுன்னோக்கிய மின்னோட்டம் 'I'யைத் தோற்றுவிக்கின்றன. வெளிச்சுற்று இணைப்பு ஏதுமில்லாத போது $I = I_g$. ஆனால் 'P' பகுதியையும் 'N' பகுதியையும், வெளிச்சுற்றில் உள்ள ஒருபளுமின்தடை 'R_L' மூலம் இணைத்தால் (படம் 10.15 (அ)) மின்னோட்டம் I_gயின் ஒருபகுதி வெளிச்சுற்றில் பாயும். இதனையே நாம் 'I_L' என குறிப்பிடுகிறோம். பளுமின்தடையில் மின்னோட்டம் பாய்வதால் அதன் இருமுனைகளிலும் ஒருமின்னியக்குவிசை தோன்றுகிறது. அது 'V_L' என்று படம் 10.15 (அ)வில் காண்பிக்கப்பட்டுள்ளது. சூரிய ஒளியினால் ஒருபளுமின்தடையில் V_L என்ற அளவு மின்னழுத்தம் தோன்றுகிறது. சூரியஒளியின் செறிவினைக் கூட்டினால் V_Lஇன் மதிப்பு உயரும். இவ்வாறாய் ஒளி ஆற்றலைச் சூரிய ஒளிமின்கல அடுக்கினால் பயனுள்ள மின் ஆற்றலாய் மாற்ற முடியும். படம் 10.15 (ஆ), சூரிய மின்கலத்தின் மின்னழுத்த மின்னோட்டச் சிறப்பியல் வரையாகும். V_{OC} மற்றும் I_{SC} ஆகியவற்றின் பெருக்கற்பலன் சூரிய மின்கலத்தின் பெரும திறன் ஆகும்.

10.11 உலோக – குறைகடத்திச் சந்திகள் (metal-semiconductor junctions)

குறைகடத்திப் படிகங்கள் பயனுள்ள உபகரணங்களாய்ச் செயற்பட அதில்மின் இணைப்பு உலோகக் கடத்திகளினால் கொடுக்கப்படுகின்றன. உலோகத்திற்கும், குறைகடத்திக்கும் இடையே உள்ள சந்தி குறைகடத்திக்குள் மின்னோட்டம் செல்வதை வரையறுக்கிறது. ஓர்உலோகத்தையும் ஒருகுறைகடத்தியையும் இணைக்கும் பொழுது, இப்பொருள்களிலிருந்து மின்னோட்டங்கள் ஒன்றனையொன்று நோக்கிப் பாய்வதால் இவற்றை இணைக்கும் சந்தியில் ஒருமின்னழுத்தத் தடுப்பு உண்டாகிறது. மேலும் P–N சந்தியில் உள்ளது போன்ற சூழ்மின்னூட்டப்பகுதியும் உண்டாகிறது.

ஓர் உலோகத் தகடு அல்லது உலோகத்தின் மெல்லிய கம்பி குறைகடத்தியைத் தொடும் போது அஃது அலைதிருத்தும் தொடுப்பாகவோ (rectifying contact) அல்லது ஓமிக்தொடுப்பாகவோ (ohmic contact) மாறலாம். இவற்றை முடிவு செய்வது மேற்கூறிய பொருள்களின் வெளியேற்று ஆற்றல்கள் (work functions) ஆகும்.

அலைதிருத்தும் தொடுப்பு (rectifying contact) :

படம் 10.16 (அ)வில் ஓர்உலோகமும் 'N' வகைக் குறைகடத்தியும் தனித்தனியே இருக்கும்போது அவற்றின் ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டங்கள் எங்குள்ளன என்பது காண்பிக்கப்பட்டுள்ளது. உலோகத்தையும் 'N' வகைக் குறைகடத்தியையும் இணைத்தவுடன் (படம் 10.16 (ஆ)) உலோகத்தின் வெளியேற்று ஆற்றல், குறைகடத்தி வெளியேற்று ஆற்றலைவிட மிகுதி[illegible]யிருக்கும்போது, ஃபெர்மி ஆற்றல்மட்டங்கள் இருபொருள்களிலும்

ஒரே ஆற்றல்நிலையிலிருக்கத் தம்மை மாற்றியமைத்துக் கொள்கின்றன. இதனால், உலோக - Nவகை குறைகடத்தி சந்தியில் ஒருதடுப்பு மின்னழுத்தம் 'V_o' வோல்ட்டு மதிப்பில் தோன்றுகிறது. மேலும் சந்திக்கு அருகில் 'N' பகுதியில் நகர்வுறா நேர்மின்னூட்டங்களும் உலோகப் பகுதியில் நகர்வுறா எதிர்மின்னூட்டங்களும் ஏற்படுவதால் சூழ்மின்னூட்டப்பகுதி 'δ' என்ற அகலத்தில் தோன்றுகிறது. ஏனெனில், குறைகடத்தியின் சந்திப்பகுதியில் உள்ள எலெக்ட்ரான்கள் உலோகத்திற்குச் சென்று விடுவதால் அங்கு எலெக்ட்ரான்கள்வற்றி நகர்வுறா நேர்மின்னூட்டங்கள் தோன்றுகின்றன. மேலும், சமநிலையில் உலோக முனையிலிருந்து 'N' வகைக் குறைகடத்திக்கு வரும் மின்னோட்ட அளவு 'N' வகைக் குறைகடத்தியிலிருந்து உலோகத்திற்கு வரும் மின்னோட்ட அளவிற்குச் சமம். அதனால், பெரும்பான்மை மின்னூட்டக் கடத்திகளின் மின்னோட்டத்தைமட்டும் எடுத்துக் கொண்டுபின்வரும் சமன்பாட்டை எழுதலாம்.

$$I_d = I_o\, e^{-eV_o/kT}$$

இங்கு I_d என்பது குறைகடத்தியிலிருந்து உலோக முனைக்குச் செல்லும் மின்னோட்டமாகும். சமநிலையில் உலோகத்திலிருந்து குறைகடத்திக்குச் செல்லும் மின்னோட்ட அளவு $-I_d$ ஆகும். உலோகமுனை நேர்மின்னழுத்தம் 'V' யிலும், குறைகடத்தி எதிர்மின்னழுத்தத்திலும் இருக்குமாறு முன்னோக்கிய சார்பு கொடுக்கப்படும்போது (படம் 10.16 (இ)) தொடுமின்னழுத்தம் V_o – விருந்து, $(V_o - V)$–க்குக்குறைவதால் குறைகடத்தியிலிருந்து எலெக்ட்ரான்கள் உலோகத்திற்குள் பாய்கின்றன. ஆனால், சந்தியில் ஏற்படும் மின்னோட்டமாகப்பின்வரும் சமன்பாட்டை எழுதலாம்; அஃதாவது, குறைகடத்தியிலிருந்து உலோகத்திற்குள் செல்லும் மின்னோட்டத்தின் மதிப்பு

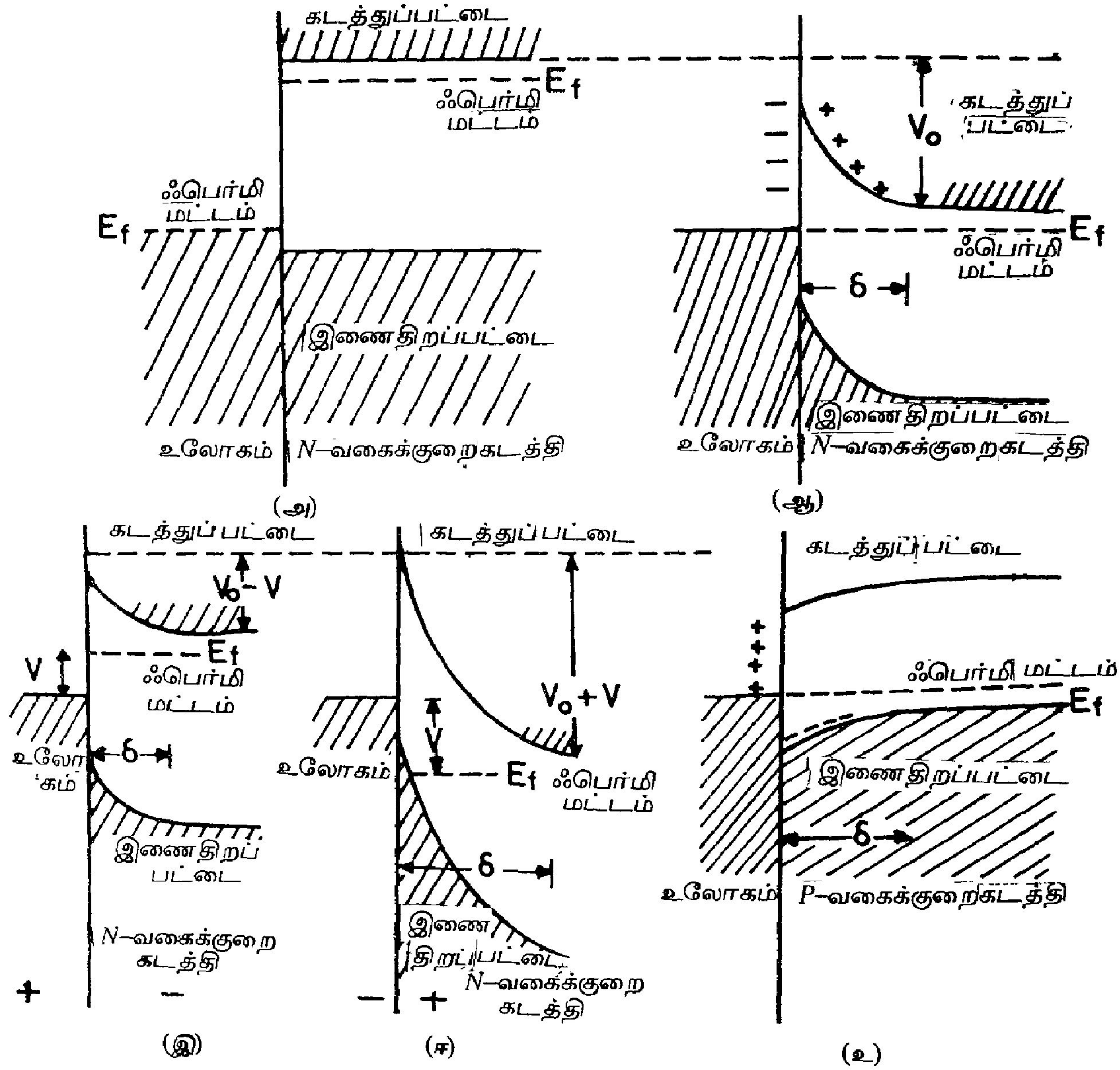
$$= I_o\, e^{-e(V_o - V)/kT}$$

$$= I_d\, e^{eV/kT}$$

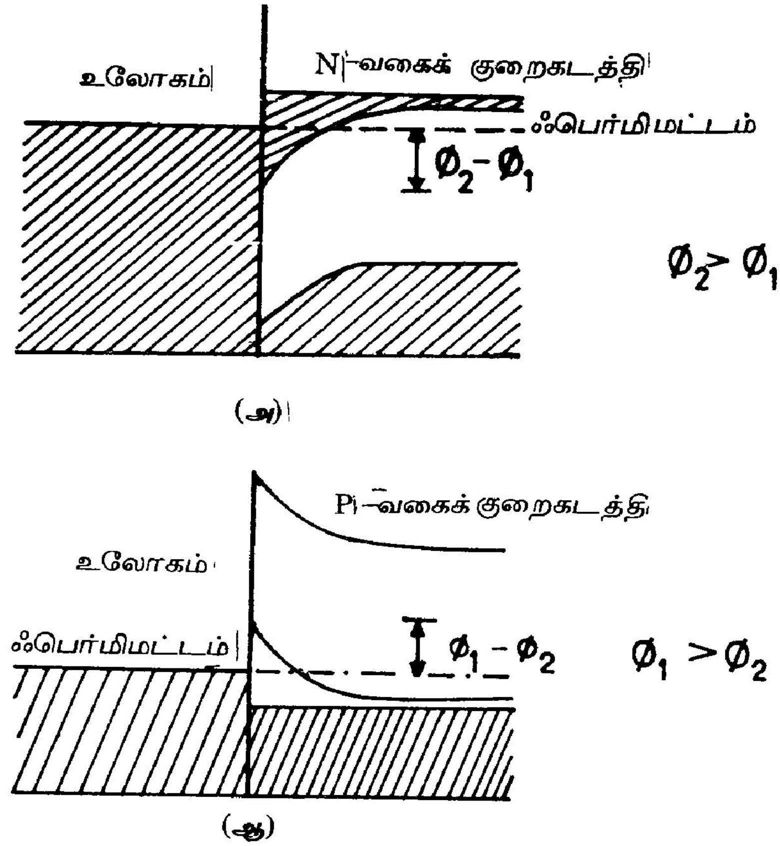
ஆனால், உலோகத்திலிருந்து குறைகடத்திக்குச் செல்லும் மின்னோட்ட மதிப்பு மாறாது. அஃதாவது, அதன் மதிப்பு $-I_d$ என இருக்கும். சந்தியில் பாயும் மொத்த மின்னோட்ட மதிப்பு, $I_{\text{முன்னோக்கிய}} = I_d\,(e^{eV/kT} - 1)$. அதனால், முன்னோக்கிய சார்பின்பொழுது சந்தியில் மிகுதியான மின்னோட்டம் பாய்கிறது. உலோக-குறைகடத்திச்சந்தியைத்திருப்பிய சார்பில் இருக்குமாறு செய்தால் தொடுமின்னழுத்தம் $V_o + V$ ஆக மாறுவதால் குறைகடத்தியிலிருந்து உலோகத்திற்குச் செல்லும் மின்னோட்டம் ஏறத்தாழச் சுழியாயிருக்கும். ஆனால், உலோகத்திலிருந்து குறைகடத்திக்கு I_d என்ற மின்னோட்டம் முன்போலவே சென்று கொண்டிருக்கும், அதனால் குறைகடத்தியிலிருந்து உலோகத்திற்குச் செல்லும் மின்னோட்டத்தின் மதிப்பு

$$= I_o\, e^{-e(V_o + V)/kT}$$

$$= I_d\, e^{-eV/kT}$$



படம் 10.16 (அ) உலோகத்தையும், 'N' – வகைக் குறைகடத்தியையும் இணைக்குமுன் உள்ள பட்டை அமைப்பு (ஆ) உலோகம் – 'N' வகைக் குறைகடத்தி இணைத்த பின்பு சமநிலையில் பட்டை அமைப்பு. இதில் 'δ' என்பது சூழ்மின்னூட்டப்பகுதி அகலம் (இங்கு வெளியேற்று ஆற்றல் மதிப்பு, குறைகடத்தியை விட உலோகத்திற்கு அதிகம்). (இ) உலோகம் நேர்மின்னழுத்தம் 'V' யில் உள்ளபோது பட்டை அமைப்பு (முன்னோக்கிய சார்பு). (ஈ) உலோகம் எதிர்மின்னழுத்தம் 'V' யில் உள்ளபோது பட்டை அமைப்பு (திருப்பிய சார்பு). (உ) உலோகம் – P வகைக் குறைகடத்தி இணைத்த பின்பு சமநிலையில் பட்டை அமைப்பு (இங்கு வெளியேற்று ஆற்றல் மதிப்பு, குறை· .த்தியை விட உலோகத்திற்குக் குறைவு).



ϕ_1 – உலோகத்தின் வெளியேற்று ஆற்றல்.

ϕ_2 – குறைகடத்தியின் வெளியேற்று ஆற்றல்.

படம் 10.17 ஓமிக் தொடுப்பின்போது ஆற்றல் பட்டையின் அமைப்பு
(அ) உலோகமும் '*N*' வகைக் குறைகடத்தியும்.
(ஆ) உலோகமும் '*P*' வகைக் குறைகடத்தியும்

உலோகத்திலிருந்து குறைகடத்திக்குச் செல்லும் மின்னோட்டம் $= -I_d$. அதனால், திருப்பிய சார்பின்போது சந்தியில் பாயும் மின்னோட்டம்,

$$I_{\text{திருப்பிய}} = I_d\,(e^{-eV/kT} - 1)$$

இங்கு $e^{-eV/kT} << 1$.

$$\therefore I_{\text{திருப்பிய}} = -I_d$$

மின்னோட்டம் மிகக் குறைந்த அளவில் பாய்வதனால் P–N சந்தியைப் போலவே உலோக – '*N*' வகைக் குறைகடத்திச் சந்தி அலைதிருத்தியாய் பயன்பட உலோகத்தின் வெளியேற்று ஆற்றல் குறைகடத்தியினுடையதைவிட அதிகமாயிருக்கவேண்டும். இது '*N*' வகைக் குறைகடத்திக்குமட்டுமில்லாது '*P*' வகைக் குறைகடத்திக்கும் பொருந்தும்.

ஆனால் முன்னோக்கிய சார்பின்போது அதிகமாக மின்னோட்டம் உலோகத்திலிருந்து 'P' வகைக் குறைகடத்திக்குப் பாய்கிறது. மேலும், உலோக – 'P' வகைக் குறைகடத்தி சந்தி அலைதிருத்தியாகப் பயன்பட உலோகத்தின் வெளியேற்று ஆற்றல் குறைகடத்தி வெளியேற்று ஆற்றலைவிட குறைவாயிருக்கவேண்டும். உலோக – 'N' வகைக் குறைகடத்தியின் சந்தியிலுள்ள தொடுமின்னழுத்தத்தைப் பின்வருமாறு எழுதலாம்,

$$V_o = \frac{e\,N_s^2}{2\,\varepsilon\,N_d} \text{ வோல்ட்டு.}$$

இங்கு $N_s =$ ஓரலகு குறைகடத்திப் புறப்பரப்பில் உள்ள ஆற்றல் நிலைகளின் எண்ணிக்கை, $N_d =$ ஓரலகு பருமனில் உள்ள கொடையணுக்களின் எண்ணிக்கை. அதனால் தொடுமின்னழுத்தம் குறைகடத்தியின் N_sயையும் N_dயையும் சார்ந்துள்ளதேயன்றி உலோகத்தைச் சார்ந்ததில்லை. மேலும், உலோக– குறைகடத்திச்சந்தியை அலைதிருத்தியாகப்பயன்படுத்த எண்ணி, இதனை மின்சுற்றில் முன்னோக்கிய சார்பில் இணைத்தால் இருஉலோகக்குறைகடத்திச்சந்திகள் ஏற்படுகின்றன. ஒரு சந்தி முன்னோக்கிய சார்பிலும் மற்றொரு சந்தி திருப்பிய சார்பிலும் இருக்கும். அதனால், இதிலிருந்து நமக்கு அலைதிருத்தும் பண்பு கிடைக்காது. இக்குறையைப் பின்வருமாறு நீக்கிவிடலாம். பூனைமீசைபோன்ற டங்க்ஸ்டன் கம்பியை 'N' வகைக் குறைகடத்தியின் குறிப்பிட்டபுள்ளியை அழுத்தித்தொடுமாறு வைத்தும், குறைகடத்தியின் மறுபக்கத்தில் உள்ள உலோக இணைப்பு மிகுந்த பரப்பில் இருக்குமாறு பற்றவைக்கவேண்டும். இங்ஙனம் உலோகம் மிகுந்த பரப்பில் குறைகடத்தியைத் தொட்டுக்கொண்டிருப்பதால் இவ்விணைப்பில் மின்தடை குறைவு. அதனால், இஃது ஓமிக் தொடுப்பு ஆகும். அதேசமயம் டங்க்ஸ்டன்கம்பி–குறைகடத்தி இணைப்பில் மின்தடை அதிகம். அதனால் இது திருத்தி இணைப்பாகும். இத்தகைய முறைகளைப் பின்பற்றித்தாமிர ஆக்ஸைடு அலைதிருத்திகளும், செலீனியம் அலைதிருத்திகளும் உற்பத்தி செய்யப்படுகின்றன. தாமிர ஆக்ஸைடு அலைதிருத்தியில் அனுமதிக்கப்படும் பெரும அளவு மின்னழுத்தம் ஏறத்தாழ 5 வோல்ட் வரைதான் இருக்கமுடியும். உயர்மாறுதிசை மின்னழுத்தங்களை அலைதிருத்தப் பல தாமிர ஆக்ஸைடு அலைதிருத்திகளை அடுக்கடுக்காய் தொடராய் இணைக்கவேண்டும். இந்த அலைதிருத்தியில் முன்னோக்கிய திசையில் மின்னோட்டம் ஆம்பியர் அளவிலும், திருப்பிய திசையில் மின்னோட்டம் சில மில்லி ஆம்பியர் அளவிலும் இருக்கும். இத்தகைய திருத்திகள் $100°C$ வரை நன்கு செயல்படும். இதேபோல் செலீனியம் அலைதிருத்தி அடுக்கு முப்பதாயிரம் வோல்ட்டு உயர்மின்னழுத்தத்திலும், 50000 ஆம்பியர் மின்னோட்ட அளவிலும் செயல்படமுடியும். மேலும், செலீனிய அலைதிருத்தி நீண்ட நாட்கள் உழைப்பதுடன் அது செயற்படுவதற்குரிய செலவும் குறைவு.

ஓமிக் தொடுப்பு (ohmic contact) :

இதுவரை உலோகத்தின் வெளியேற்று ஆற்றல் 'N' வகைக்குறைகடத்தியினுடையதை விட மிகுதியாய் இருக்கும்போது அந்த உலோகக்குறைகடத்திச்சந்தி அலைதிருத்தியாய்ச் செயல்படுவதைக் கண்டோம். ஆனால், உலோகத்தின் வெளியேற்று ஆற்றல் 'N' வகைக்

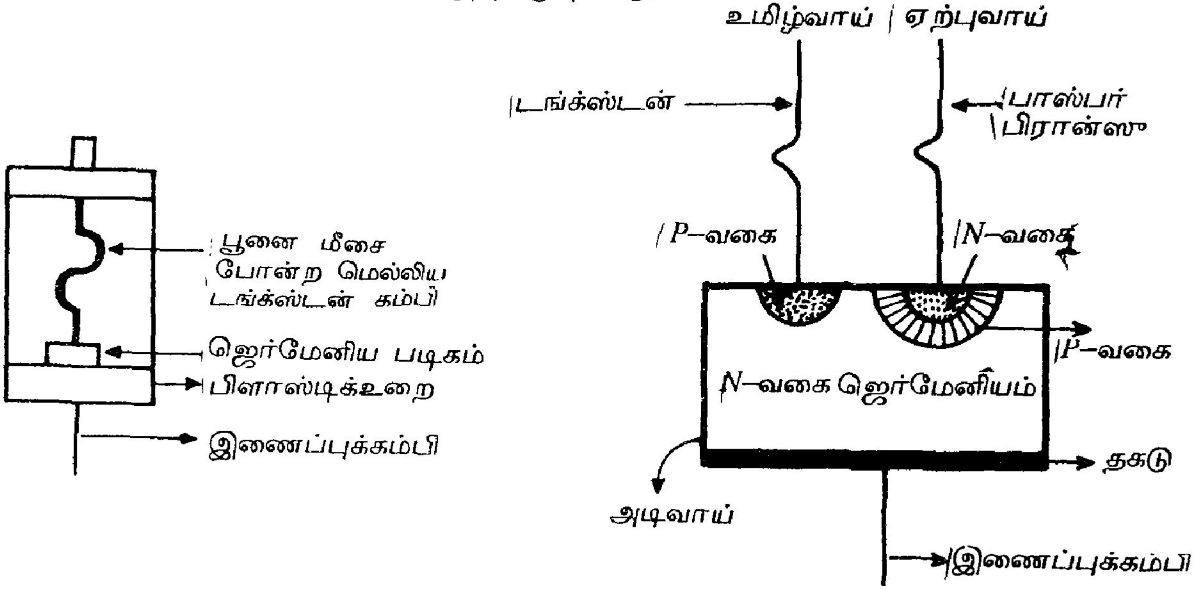
குறைகடத்தி வெளியேற்று ஆற்றலைவிடக்குறைவாயிருந்தால் அது ஓமிக் தொடுப்பாகச் செயல்படும். இங்கு எலெக்ட்ரான்கள் உலோகத்திலிருந்து குறைகடத்திக்குச் செல்வதால் சந்தியில் உலோகப்புறப்பரப்பு நேர்மின்னழுத்தத்திலும், குறைகடத்தியின் புறப்பரப்பு எதிர்மின்னழுத்தத்திலும் இருக்கும். அதனால் இந்த எதிர்மின்னழுத்தம் தொடுபகுதியின் அருகே உள்ள குறைகடத்தியின் கடத்துப்பட்டையின் அடிமட்டத்தைச் சிறிது கீழ்நோக்கித்தள்ளுகிறது இதனால் ஃபெர்மி ஆற்றல்மட்டம் ஒரே ஆற்றலில் இருபகுதியிலும் உள்ளது. (படம் 10.17) இங்கு அலைதிருத்தி இணைப்பில் ஏற்பட்டதுபோன்ற தடுப்பு மின்னழுத்தம் ஏதும் ஏற்படுவதில்லை. அதனால், முன்னோக்கிய சார்பிலும், திருப்பிய சார்பிலும் சந்தியில் பாயும் மின்னோட்டம் செலுத்தப்படும் மின்னழுத்தத்திற்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது. அஃதாவது, ஓமின் விதியை இங்கு பயன்படுத்தலாம். அதனால்தான் இதனை **ஓமிக் தொடுப்பு** என்று கூறுவர். ஆகையால் உலோக –'*N*' வகைக்குறைகடத்தியின் சந்தி அலைதிருத்தியாய்ப் பயன்பட உலோகத்தின் வெளியேற்று ஆற்றல் '*N*' வகைக் குறைகடத்தியின் வெளியேற்று ஆற்றலைவிட மிகுதியாயிருக்க வேண்டும். அவ்வாறு இல்லாமல், '*N*' வகைக் குறைகடத்தியின் வெளியேற்று ஆற்றலைவிடக் குறைவாயிருந்தால் அஃது ஓமிக் தொடுப்பாகச் செயற்படும். மேலும், உலோக –'*P*' வகைக் குறை கடத்திச்சந்தி அலைதிருத்தியாய்ச் செயற்பட உலோகத்தின் வெளியேற்று ஆற்றல் '*P*' வகைக் குறைகடத்தியின் வெளியேற்று ஆற்றலை விடக் குறைவாயிருக்க வேண்டும். அங்ஙனமில்லாமல் மிகுதியாயிருந்தால் அஃது ஓர் ஓமிக் தொடுப்பாயிருக்கும். பெரும்பாலும் குறைகடத்திப்பொருள்களில் தாமிரம் ஓமிக் தொடுப்பாய்பயன்படுத்தப்படுவதில்லை. ஏனெனில் தாமிர-குறைகடத்தித் தொடுப்பு, அதிக மின்தடைகொண்டு ஓமிக் தொடுப்பாய்ச் செயல்படாமல் திருத்தித் தொடுப்பாய்ச் செயல்படுகிறது. வெள்ளி-குறைகடத்தித் தொடுப்பு, ஓமிக் தொடுப்பாய்ச் செயல்படுகிறது. எனவே குறைகடத்திகளில் மின்வாய்களாக (electrodes) வெள்ளிக்கம்பிகளே பயன்படுகின்றன.

10.12 பல்வகை டிரான்சிஸ்டர்களும், டையோடுகளும்

டிரான்சிஸ்டர்களுக்கு பல சிறப்பியல்புகள் உள. குறிப்பாக அதிக நாட்கள் நன்கு உழைக்கின்றன; வெற்றிடக் குழல்களைப் போலில்லாது குறைந்த மின்னழுத்தங்களில் செயல்புரிகின்றன; மின்னூட்டக் கடத்திகள் வெப்ப அயனி உமிழ்வு முறையில் உற்பத்திச் செய்யப்படுவதில்லை. அதனால் எதிர்முனையை வெப்பப்படுத்த வேண்டுவதில்லை. அதனால் பயனீட்டு ஆற்றல் (energy consumed) குறைகிறது. மேலும், டிரான்சிஸ்டரின் பருமன் மிகக் குறைந்த அளவில் உள்ளது. இவற்றால் இன்று மின்னியற்கருவிகளும், செய்தித்தொடர்பு கருவிகளும் டிரான்சிஸ்டர்களாலும், குறைகடத்தி டையோடுகளாலும் உற்பத்தி செய்யப்படுகின்றன. எனினும், அவற்றை முழுச் செயல்திறமுடைய கருவிகள் என கூறிவிட முடியாது. ஏனெனில் டிரான்சிஸ்டரில் வெப்பநிலை வேறுபாட்டிற்கு ஏற்ப அதன் செயற்திறனும் மாறுகிறது. இந்த ஒரு குறையைத் தவிர்த்து மற்றைய நன்மைகளை மனத்தில் கொண்டோமானால் டிரான்சிஸ்டரை மனிதச் சமுதாயத்திற்குக் கிடைத்த ஒருமாபெரும் தன்னலம் கருதாத் தொண்டனாய்க் கருதலாம்.

(அ) புள்ளிதொடு டிரான்சிஸ்டர்களும், புள்ளிதொடு டையோடுகளும் (point–contact transistors and point–contact diodes)

புள்ளிதொடு டிரான்சிஸ்டர்களும், டையோடுகளும் முதலில் கண்டு பிடிக்கப்பட்டவையாகும். ஆனால், இவற்றை உயர்மின்னழுத்தங்களிலோ, உயர்மின்னோட்டங்களிலோ பயன்படுத்த முடியாது.



(அ) டையோடு (ஆ) டிரான்சிஸ்டர்

படம் 10.18 புள்ளிதொடு டையோடும், டிரான்சிஸ்டரும்.

எனினும், புள்ளிதொடு டையோடுகள் மிகஉயர்அதிர்வெண்களில் சந்தி டையோடுகளைவிட மிகநன்றாய்ச் செயல்படுகின்றன. ஏனெனில், புள்ளிதொடுடையோடுகள் சந்தியில் மிகக் குறைந்த உள்மின்தேக்குத்திறனைப் பெற்றிருக்கின்றன. இதனால் இவை நுண்ணலைப் பகுப்பான்களாகப் (microwave detectors) பயன்படுத்தப்படுகின்றன. இம்முறையில் டிரான்சிஸ்டர் செய்து அதில் பொதுஅடிவாய் இணைப்புச் சுற்றில் பயன்படுத்தினால், அந்த இணைப்பில் உள்ள மின்னோட்டப் பெருக்குத்திறன் 'α'வின் மதிப்பு '2'விருந்து '4'க்குள் இருக்கும். ஆனால், சந்தி டிரான்சிஸ்டருக்குப் பொது அடிவாய் இணைப்பில் $\alpha < 1$ என இருக்கும். இவ்வகை டிரான்சிஸ்டர்கள் நடைமுறையில் இல்லை. ஏனெனில், இவற்றைத் தயார் செய்வது மிகக் கடினம்; மேலும் இவ்வகை டிரான்சிஸ்டர்களில் மின் இரைச்சல் மிகுதி. படம் 10.18 (அ) வில் புள்ளிதொடுடையோடும், 10.18 (ஆ) வில் புள்ளிதொடு டிரான்சிஸ்டரும் காண்பிக்கப்பட்டுள்ளன.

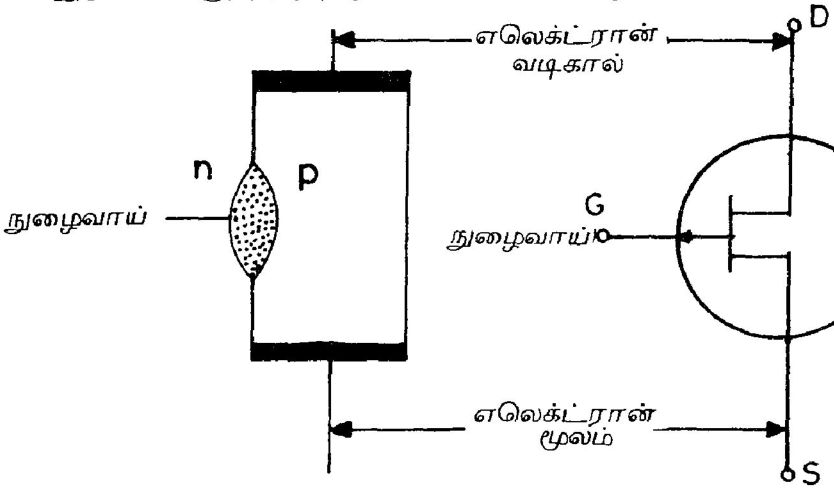
(ஆ) சந்தி டிரான்சிஸ்டர்களும், சந்தி டையோடுகளும் (junction transistors and junction diodes) :

சந்தி டையோடுகள், டிரான்சிஸ்டர்கள் பற்றி விரிவாகக் கண்டோம். பொதுவாக இவ்வகை டையோடுகளும், டிரான்சிஸ்டர்களும் குறைந்த உற்பத்திச் செலவில் தயார்செய்யப்படுகின்றன. இவற்றில் மின்இரைச்சல் (noise) குறைவு. மேலும், இவ்வகை

டிரான்சிஸ்டர்களிலும், டையோடுகளிலும் மிகுந்த மின்திறனைப் பயன்படுத்தலாம். இவ்வகைச் சந்திகள் 10^{-10} செகண்டிற்குள் செயற்பாட்டினைத்தருவதால் இவற்றை 10^{9} ஹெர்ட்ஸிகளில் இணைப்பிகளாயும் (switches) செயற்படுத்தலாம். இருவகை மின்னூட்டக் கடத்திகள் (எலெக்ட்ரான், துளை) செயற்படுவதால் இதனை இருமுனை டிரான்சிஸ்டர் (bipolar transistor) என்றும், விரவல் டிரான்சிஸ்டர் (diffusion transistor) என்றும் கூறுவர்.

(இ) புல விளைவு டிரான்சிஸ்டர்கள் (field effect transistors):

புலவிளைவு டிரான்சிஸ்டர் வழக்கமான டிரான்சிஸ்டர்களின் அமைப்பிலும் செயல்முறையிலும் மாறுபட்ட ஒன்றாகும். இதனைச் சுருக்கமாக பெட் (FET) என்றும் கூறுவர். வழக்கமான டிரான்சிஸ்டர்களில் எலெக்ட்ரான்களும், துளைகளும் மின்னோட்டத்தில் முக்கியப் பங்கு வகிப்பதால் அவற்றை இருமுனை டிரான்சிஸ்டர்கள் (bipolar transistors) என்பர். ஆனால், புலவிளைவு டிரான்சிஸ்டரில் எலெக்ட்ரான் அல்லது துளை மட்டும் மின்னோட்டத்தில் பங்கு பெறுவதால் இதனை ஒருமுனை டிரான்சிஸ்டர் (unipolar transistor) என்பர். வழக்கமான டிரான்சிஸ்டர்களில் இருக்கும் இரைச்சல் மட்டம் (noise level) இங்கு மிகக் குறைவாயிருக்கும். இதற்குக் காரணம் குறைவான அதிர்வெண்களில் இதன் உள்ளீடு மின்மறுப்புவின் (input impedance) மதிப்பு ஏறத்தாழ வரையிலியாகும். மேலும், கதிரியக்க அணுக்கள் வீசும் கதிர்வீச்சினால் இது பாதிக்கப்படுவதில்லை. வழக்கமான டிரான்சிஸ்டர்கள் மின்னோட்டச் செயற்பாட்டுக்கருவிகள் (current operated devices) ஆகும். ஆனால், இதுமின்னழுத்தத்திற்குக் கட்டுப்பட்ட கருவி (voltage controlled device) ஆகும்.



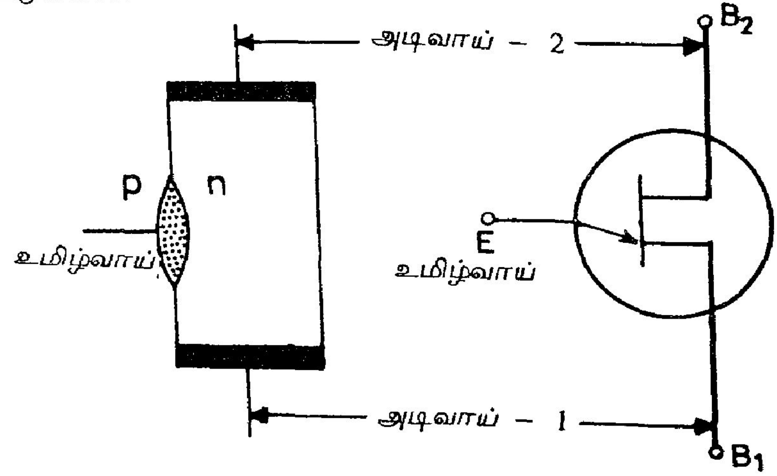
படம் **10.19 புலவிளைவு டிரான்சிஸ்டரும், சுற்றில் அதன் குறியீடும்.**

புலவிளைவு டிரான்சிஸ்டரில் உள்ளீடு சைகை நுழைவாயில் கொடுக்கப்பட்டவுடன் அது புலவிளைவு டிரான்சிஸ்டரின் மின்கடத்தும் வடிகாலின் (channel) அகலத்தை மாற்றி அதன் மூலமாய் அதன் மின்தடையைக் கட்டுப்படுத்தப்படுகிறது. அதனால் உள்ளீட்டுச்சைகை வடிகால் மின்னோட்டத்தில் மாறுபாட்டைத் தோற்றுவிக்கிறது. சைகையில் மாறுபாடு மிகச்சிறியதாயிருந்தாலும் வடிகால் மின்னோட்டத்தில் பெருமளவு

மாற்றம் தோன்றுவதால் இதனைப் பெருக்கியாகச் செயல்படுத்தலாம். மேலும் இப்புலவிளைவு டிரான்சிஸ்டர் சிறப்பியல்புகள் வெற்றிடக்குழல் பென்டோடின் (pentode) சிறப்பியல்புகளை ஒத்திருப்பதால் இதன் உள்ளீடு மின்மறுப்பும், வெளியீடு மின்மறுப்பும் (output impedance) மிகுதியாயிருக்கும். படம் 10.19ல் '*P*' வகைக் கால்வாயைக் கொண்டு தயாரிக்கப்பட்ட புலவிளைவு டிரான்சிஸ்டரும், சுற்றில் அதன் குறியீடும் கொடுக்கப்பட்டுள்ளன.

(ஈ) **ஒற்றைச் சந்தி டிரான்சிஸ்டர்** (unijunction transistor)

ஒற்றைச் சந்தி டிரான்சிஸ்டரில் புலவிளைவு டிரான்சிஸ்டர்போல் ஒரே சந்தி இருக்கிறது. ஆனால், செயல்படுதிறனில் இருடிரான்சிஸ்டர்களும் வேறுபட்டவை. இதில் இரண்டு அடிவாய்கள் உள்ளன. அதனால், முதலில் இதனை இரட்டை அடிவாய் டையோடு (double base diode) என்றழைத்தனர். செயல்முறையில் வாயு அடைக்கப்பட்ட தைராட்டிரான் வெற்றிடக்குழல் போல் உள்ளது. மேலும், இதில் புழல்விளைவு டையோடுபோல் இதன் மின்னோட்ட-மின்னழுத்தச் சிறப்பியல் வரையில் எதிர்மின் தடைப்பகுதி உள்ளது. ஏனெனில், இப்பகுதியில் மின்னோட்டம் பெருமளவு ஓட, மின்னழுத்தம் வீழ்ச்சியடைகிறது. இப்பகுதிதான் ஒற்றைச்சந்தி டிரான்சிஸ்டரின் சிறப்புக் குணத்திற்குக் காரணம் இந்த ஒற்றைச் சந்தி டிரான்சிஸ்டரை இரம்பப்பல் அலையை (saw toothed wave)த் தோற்றுவிக்கவும், பல்அதிர்வி (multivibrator) செய்யவும் பயன்படுத்தலாம். படம் 10.20ல் ஒற்றைச் சந்திடிரான்சிஸ்டரும், சுற்றில் அதன்குறியீடும் காண்பிக்கப்பட்டுள்ளன.



படம் **10.20** N–வகைச் சிலிக்கானில் தயாரிக்கப்பட்ட ஒற்றைச்சந்தி டிரான்சிஸ்டரும், சுற்றில் அதன் குறியீடும்

10.13 டையோடுகளையும், டிரான்சிஸ்டர்களையும் தயாரிக்கும் முறைகள்

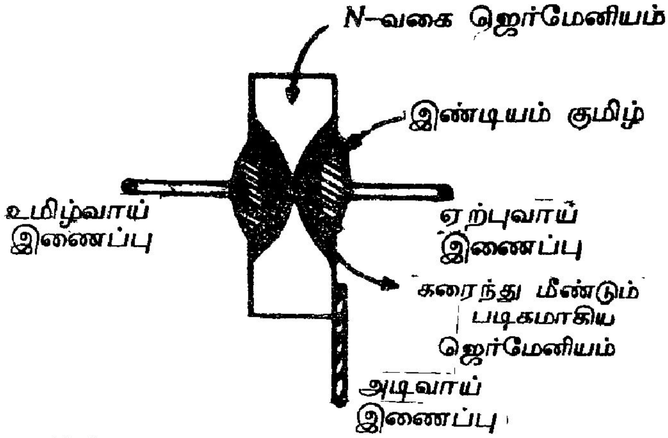
பெரும்பாலும் டிரான்சிஸ்டர்களும், டையோடுகளும் வளர்த்தல் (growing), கலப்பு உலோகம் சேர்த்தல் (alloying), விரவல் (diffusion) ஆகிய முறைகளில் ஏதேனும் ஒன்றனைப் பின்பற்றியோ, அல்லது இருமுறைகளைக் கூட்டுச்சேர்த்தோ தயாரிக்கப்படுகின்றன.

வளர்க்கப்பட்ட சந்தி (grown junction) :

வளர்க்கப்பட்ட சந்தி டையோடு அல்லது டிரான்சிஸ்டர் தயாரிக்க ஒருபடிக வளர் உலை (crystal growing furnace) பயன்படுத்தப்படுகிறது. இதில் ஒற்றைக் குறைகடத்திவிதைப்படிகம் (seed crystal) ஒன்று உருகிய குறைகடத்திக்குழம்பின் புறப்பரப்பைத் தொட்டுக்கொண்டிருக்கும். பிறகு அந்த விதைப் படிகத்தைச் சுற்றிப்படிகம் மெல்ல மெல்ல வளரத் தொடங்கும். படிகம் வளர வளர மெதுவாய் விதைப்படிகம் மேலே இழுக்கப்படும். இதேநேரத்தில் விதைப்படிகத்தைத் தாங்கும் நீள் தண்டு மெதுவாய்ச் சுழற்றப்படுவதால் வளரும் படிகம் சமச்சீருடையதாய் இருக்கும். உருகிய குறைகடத்திக்குழம்பில் ஆர்சினிக் அல்லது பாஸ்பரம் கணக்கிடப்பட்ட அளவில் சேர்க்கப்பட்டால் நமக்கு '*N*' வகைக் குறைகடத்தியும், அதே குழம்பில் பின் அலுமினியம் அல்லது போரானை, '*N*' வகை வேற்றுப்பொருளின் அளவைவிட அதிக அளவில் சேர்த்தால் '*N*' வகைப்படிகத்தின் மேலே '*P*' வகைப் படிகம் வளரும். இவ்வாறு வளர்க்கப்பட்ட படிகத்தை நுண்வெட்டியால் (micro-cutter) வெட்டி அதில் மின் முனைகளை இணைக்க நமக்கு டையோடுகளும், டிரான்சிஸ்டர்களும் கிடைக்கும். இவ்வாறு தயாரிக்கப்பட்ட டிரான்சிஸ்டரை வளர்க்கப்பட்ட சந்தி டிரான்சிஸ்டர் (grown junction transistor) அல்லது இருமுறைகலக்கப்பட்ட டிரான்சிஸ்டர் (double doped transistor) என்று கூறுவர்.

மேற்கண்டமுறையிலிருந்து சிறிது மாறுபட்ட முறையும் ஒன்று. அதில் '*N*' வகை வேற்றுப் பொருள்களையும் '*P*' வகை வேற்றுப்பொருள்களையும் அடுத்தடுத்து வரிசையாக உருகிய குறைகடத்திக் குழம்பில் கலக்கப்படுதற்குப் பதிலாய் முதலிலேயே '*N*' வகை, '*P*' வகைப் பொருள்களை உருகிய குறைகடத்திக் குழம்பில் சேர்த்துவிடவேண்டும்; உருகிய குழம்பிலிருந்து விதைப்படிகம் மேல்நோக்கி இழுக்கப்படும் வேகவீதம் திடீரென மாற்றப்படுவதனால் நமக்குத் தேவையான வளர்க்கப்பட்ட '*P*' வகை, '*N*' வகைப்பகுதிகள் ஒரே படிகத்தில் கிடைக்கும். உதாரணமாய் ஒரு படிகத்தில் '*N*' வகைப் பகுதி மிக அதிகமான வீதத்திலும் '*P*' வகைப்பகுதி மிகக்குறைவான வீதத்திலும் வளர்வதாய்க்கொள்வோம். மேலே கூறப்பட்ட ஒன்று சாத்தியமானதாகும். ஏனெனில் வளரும் வீதம் வேற்றுப் பொருள்களின் கரையும் தன்மை (solubility)யைப் பொருத்தது. அதனால் வேற்றுப் பொருள்கள் படிகத்தின் மேல் வளர்தல், விதைப்படிகத்தை மேலே இழுக்கும் வீதத்தைப் பொருத்துள்ளது. வளரும் வீதத்தை கட்டுப்படுத்துவதனால் அடுத்தடுத்த '*P*', '*N*' வகைப் பகுதிகள் வரிசையாய் ஒரே படிகத்தில் வளரவாய்ப்புண்டு. உருகி ஒட்டிய (melt back) அல்லது கலப்பு உலோகச்சந்தி (alloy junction) டையோடுகளும், டிரான்சிஸ்டர்களும் பின்வருமாறு தயாரிக்கப்படுகின்றன. ஒரு *PNP* டிரான்சிஸ்டரை உருவாக்க ஒரு '*N*' வகை ஜெர்மேனியத்தகட்டின் இருபுறங்களிலும் இண்டியம் சிறுகுமிழ் வடிவில் வைக்கப்படுகின்றது. பின் இந்த இண்டியம் குமிழ்களையுடைய '*N*' வகை ஜெர்மேனியம் 155°C வரை வெப்பப்படுத்தப்படுகிறது. இப்போது இண்டியம்மட்டும் உருகும். ஜெர்மேனியம் உருகாது. உருகிய இண்டியத்திலிருந்து அணுக்கள் விரவல் முறையில் '*N*' வகை ஜெர்மேனியத்துடன் கலந்து, சிறிது ஜெர்மேனியத்தையும் கரைத்து விடுகிறது. பின் இதனைக்குளிரவைக்கும்போது இண்டியம் அடங்கிய ஜெர்மேனியம் மீண்டும் படிகமாகிறது. இந்தப்படிகப்பகுதி '*P*'

வகையாக இருக்கும். மேலும், குளிரவைத்தால் இண்டியம் அப்படியே குமிழாக உறைந்துவிடும். இந்தக் குமிழில் சிறிது ஜெர்மேனியமும் கலந்திருப்பதால் இதனைக் கலப்பு உலோகச்சந்தி டிரான்சிஸ்டர் என்று கூறுவர்.



படம் 10.21 உருக்கி ஒட்டிய கலப்பு உலோக டிரான்சிஸ்டர்

படம் 10.21ல் குமிழ்ப் பகுதிகள் ஏற்புவாயாகவும், உமிழ்வாயாகவும் '*N*' வகை ஜெர்மேனியத்தகடு அடிவாயாகவும் செயல்படுதல் காண்பிக்கப்பட்டுள்ளது. பெரும்பாலும் இம்முறையில் *PNP* டிரான்சிஸ்டர்கள்மட்டும் தயாரிக்கப்படுகின்றன. மேலும், ஆவிஊட்புகும் முறையிலும் (vapor diffusion method) டிரான்சிஸ்டர்கள் தயாரிக்கப்படுகின்றன. இம்முறையில் திண்மப் பொருளாயுள்ள '*N*' வகை ஜெர்மேனியத்தகட்டின்மீது ஆவி வடிவில் இண்டியம் அல்லது போரான் டிரைகுளோரைடு பீச்சியடிக்கப்படுகிறது. இவ்வாறு '*P*' வகை வேற்று அணுக்கள் ஆவிவழியாய் '*N*' வகை குறைகடத்திக்குள் உட்புகுத்தப்படுகிறது. ஆவிபடும் இடத்தில் பள்ளம் உருவாகி அதில் P வகை வேற்றுஅணுக்கள் குமிழ்போல் படியும்; படிந்தவுடன் இவை கெட்டியாகி ஒரு *PNP* டிரான்சிஸ்டர் ஆகிவிடும். இன்னும் பல அரிய முறைகளில் தரமிக்க டிரான்சிஸ்டர்கள் உருவாக்கப் படுகின்றன. மேலும், பல புதிய உற்பத்தி முறைகளுக்குரிய ஆய்வுகளும் நடந்துகொண்டிருக்கின்றன.

10.14. தொகைநிலைச்சுற்று தொழில்நுட்பம் (Integrated Circuit Technology)

தொகைநிலைச்சுற்று என்பது ஒரு குறைகடத்திப்படிகத்தாளின் மீது மென்படலங்களாய் வளர்க்கப்பட்ட டிரான்சிஸ்டர்கள், மின் தடைகள், மின்தேக்கிகள் அடங்கிய மின்சுற்றாகும். இத்தொகைநிலைச் சுற்றின்மூலம், சிறிய அளவிலான, விலைகுறைந்த, மின்திறனைக்குறைவாகப் பயன்படுத்தும் உயர்ந்த தரமிக்கச் சுற்றுகள் உருவாகின்றன. தற்போது அதிக எண்ணிக்கைச் சுற்றுகளைக் கொண்ட சிறிய அளவிலான தொகைநிலைச்சுற்றுகள் (Very Large Scale Integration circuits) உற்பத்திச் செய்யப்படுகின்றன.

எடுத்துக்காட்டாக, ஒரு மென்படல நிலையில் உள்ள டிரான்சிஸ்டரை உருவாக்கும் முறையைக் காண்போம். முதலில் போரான் கலந்த P- வகை சிலிக்கான்,

ஒற்றைப்படிகமாக உருகிய சிலிக்கான் கலவையின் மூலம் வளர்க்கப்படுகிறது. பின் அது மென் தகடுகளாக வெட்டப்படுகிறது. மெருகேற்றியபின் அத்தகடு (wafer) தொகைநிலைச சுற்றின் அடிப்பகுதியாகப் பயன்படுகிறது. பின் ஆவி உட்புகும் முறையில் 5 முதல் 25 மைக்ரோ மீட்டர் தடிமனில் $n-$ வகை ஏடு, $p-$வகை சிலிக்கானின் மீது வளர்க்கப்படுகிறது. பிறகு ஒரு மெல்லிய சிலிக்கா ஏடு $n-$வகை ஏட்டின் மீது உருவாக்கப்படுகிறது. சிலிக்கா ஏடு மாசுஅணுக்களின் விரவலைத்தடுக்கிறது. கல்லைச் செதுக்கி சிலையை உருவாக்குவது போல், ஒளிமூலம் மேற்கண்ட தகட்டில் செதுக்கு வேலை (etching) செய்து, அடிவாய், உமிழ்வாய், ஏற்புவாய் கொண்ட $n-p-n$ டிரான்சிஸ்டர் உருவாக்கப்படுகிறது. இம்முறையை ஒளியாய அச்சுமுறை (photolithography) என்பர். ஒரு தொகை நிலைச்சுற்றின் பல்வேறு உபகரணங்களையும் இணைக்க அலுமினிய இணைப்புகள் பயன்படுத்தப்படுகின்றன. அலுமினியம் ஆவி நிலையில் படிய வைக்கப்படுகிறது. மேற்கண்ட முறைப்படி, டிரான்சிஸ்டர், டையோடு, மின்தடை, மின்தேக்கி போன்றவை சுற்றில் இணைக்கப்பட்ட நிலையில் மென் படலங்களாய் உருவாக்கப்படுகின்றன. மேலும் இம்முறையில் ஒரு மென்தகட்டில் 100,000க்கும் மேற்பட்ட சுற்றுகளை உருவாக்கலாம்.

தொகைநிலைச் சுற்றுகளை இருவகைகளாகப்பிரிக்கலாம். ஓரினச்சுற்று (monolithic circuit) மற்றும் கலப்பினச்சுற்று (hybrid circuit) ஆகும். ஓரின தொகைநிலைச்சுற்று, மேலே கூறப்பட்டபடி ஒற்றைப்படிக சிலிக்கான் சீவலில் தயாரிக்கப்படுகிறது. கலப்பினத்தொகைநிலைச்சுற்று ஒரு மின்கடத்தாப் பொருள் மீது கடத்தி-மின்தடை மென்படலங்களைப் படியவைப்பதன்மூலம் தயாரிக்கப்படுகிறது.

மாதிரிக்கணக்கு :

ஜெர்மேனியத்தில் ஒரு $P-N$ சந்தியை 'P' பகுதியில் 80 ஓம்$^{-1}$ மீட்டர்$^{-1}$, 'N' பகுதியில் 160 ஓம்$^{-1}$ மீட்டர்$^{-1}$ என்னும் அளவுகளில் கடத்துந்திறன் இருக்குமாறு உருவாக்கப்படுகிறது. 300 கெல்வினில் அதன் தடுப்பு மின்னழுத்தத்தையும், வற்றிய பகுதியின் அகலத்தையும் கணக்கிடுக. துளைகளின் நகர்வுதிறன் $= 0.2$ மீ^{2}/வோல்ட்-செகண்டு. எலெக்ட்ரான்களின் நகர்வுதிறன் $= 0.4$ மீ^{2}/வோல்ட்-செகண்டு. தூய ஜெர்மேனியத்தின் மின்னூட்டக் கடத்திகளின் அடர்த்தி $= 2.1 \times 10^{19}$ மீ$^{-3}$. போல்ட்ஸ்மேன் மாறிலி $= 1.38 \times 10^{-23}$ ஜூல்/கெல்வின். ஜெர்மேனியத்தின் மின்மறுப்புத்திறன் $= 1.78 \times 10^{-9}$ பாராடு/மீட்டர்.

மின்கடத்துந்திறனுக்குப் பெரும்பான்மை மின்னூட்டக் கடத்திகளே முக்கியபங்கு வகிக்கின்றன என வைத்துக் கொள்வோம்.

ஆகையால்

$$N_d = \frac{\sigma_n}{e\,\mu_n} = \frac{160}{1.6 \times 10^{-19} \times 0.4} = 2.5 \times 10^{21} / \text{ மீ}^3$$

$$N_a = \frac{\sigma_p}{e\,\mu_p} = \frac{80}{1.6 \times 10^{-19} \times 0.2}$$

$$= 2.5 \times 10^{21} / \text{மீ}^3$$

$$V_o = \frac{kT}{e} \log \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right)$$

$$= \frac{1.38 \times 10^{-23} \times 300}{1.6 \times 10^{-19}} \log \frac{(2.5 \times 10^{21})^2}{(2.1 \times 10^{19})^2}$$

$$= 0.0258 \log \frac{6.25 \times 10^{42}}{4.41 \times 10^{38}} = 0.0258 \log (1.418 \times 10^4)$$

$\therefore\ V_o = 0.0258 \times 9.5594 = 0.2467$ வோல்ட்டு.

வற்றிய பகுதியின் அகலம் $= \left[\frac{2\,\varepsilon V_o\,(N_a + N_d)}{e\,N_d N_a} \right]^{\frac{1}{2}}$

$$= \left[\frac{2 \times 1.78 \times 10^{-9} \times 0.2467 \times 2}{1.6 \times 10^{-19} \times 2.5 \times 10^{21}} \right]^{\frac{1}{2}} = 2.096 \times 10^{-6} \text{ மீட்டர்}$$

குறிப்பு : கணக்கில் பொருளின் மின்மறுப்புதிறனுக்குப் பதிலாய் மின்கடத்தாப் பொருள் மாறிலி கொடுக்கப்பட்டால், மின்கடத்தாப்பொருள் மாறிலியை 8.85×10^{-12} பாராடு/மீட்டர் ஆல் பெருக்கி வரும் மதிப்பே அப்பொருளின் மின் மறுப்புத் திறனாகும்.

சுருக்கம்

1. ஒரு P–N சந்தி உருவாகும்போது 'P' பகுதியிலும் 'N' பகுதியிலும் ஃபெர்மி ஆற்றல்மட்டம் ஒரே ஆற்றல் நிலையில் இருப்பதற்குத்தன்னைத் தானே மாற்றி அமைத்துக்கொள்கிறது. அதனால், சந்தியில் தடுப்புமின்னழுத்தம் தோன்றுகிறது.
2. P–N சந்தியில் சார்புமின்னழுத்தம் இல்லாதபோது பெரும்பான்மை மின்னூட்டக் கடத்திகளால் ஏற்படும் மின்னோட்டம் சிறுபான்மை கடத்திகளால் ஏற்படும் மின்னோட்டத்திற்குச்சமம். அதனால் சந்தியில் மின்னோட்டம் ஏதும் இராது.
3. தடுப்பு மின்னழுத்த உயரம் சிறிது குறைந்தாலும் சந்தி வழியே செல்லும் மின்னோட்டம், தடுப்பு மின்னழுத்த உயரமாற்றத்தின் அடுக்குக்குறி சார்பில் உயருகிறது.

4. P–N சந்தியில் முன்னோக்கிய சார்பு மின்னழுத்தத்தின்போது அதிக மின்னோட்டமும், திருப்பிய சார்பு மின்னழுத்தத்தின்போது குறைவான திருப்பிய தெவிட்டு மின்னோட்டமும் பாய்கின்றன. ஆனால், திருப்பிய சார்பு மின்னழுத்தம் சீர்குலைவு மின்னழுத்தத்திற்குச் சமமாகும்போது அதிக மின்னோட்டம் சந்தியில் பாய்கிறது. இதற்குக்காரணம் சந்தியில் ஏற்படும் அதிக ஆற்றல் வாய்ந்த உள்மின்புலம் ஆகும்.

5. வற்றிய பகுதியில் நகர்வுறும் மின்னூட்டக்கடத்தி ஏதுமில்லை. அதன் அகலம் தடுப்புமின்னழுத்தத்தையும், கலக்கப்பட்ட வேற்றுப்பொருளின் அடர்த்தியையும் பொருளின் மின்மறுப்புத் திறனையும் சார்ந்துள்ளது..

6. ஒரு P–N சந்தி அலைதிருத்தியாயும், மின்னழுத்தச் சீர்தூக்கியாயும், ஒளியால் மின் ஆற்றலைத் தோற்றுவிக்கும் கருவியாயும் செயல்படமுடியும்.

7. டிரான்சிஸ்டர், மின்னோட்டத்தைக் குறைந்த மின்தடைப் பகுதியிலிருந்து அதிக மின்தடைப் பகுதிக்குக் கடத்துகிறது. அது பெருக்கியாயும், அலை இயற்றியாயும் செயல்படுகிறது..

8. உலோக-குறைகடத்தி சந்தி திருத்தித் தொடுப்பாகவோ அல்லது ஓமிக் தொடுப்பாகவோ செயல்படுதல், அவற்றின் வெளியேற்று ஆற்றல் மதிப்புகளைச் சார்ந்துள்ளது.

9. சந்தி டிரான்சிஸ்டர், புள்ளிதொடு டிரான்சிஸ்டர் ஆகியவை இருமுனை டிரான்சிஸ்டர்களாகும். புல விளைவு டிரான்சிஸ்டர், ஒற்றைச் சந்தி டிரான்சிஸ்டர் ஆகியவை ஒருமுனை டிரான்சிஸ்டர்களாகும்.

10. டையோடுகளும், டிரான்சிஸ்டர்களும், வளர்க்கப்பட்ட சந்தி, கலப்பு உலோகச் சந்தி, ஆவி உட்புகுந்த சந்தி போன்றவற்றை வளர்த்து அவற்றில் மின்வாய் இணைப்புகளைக் கொடுப்பதால் நமக்குக் கிடைக்கின்றன.

வினாக்கள்

1. சமநிலையில் P–N சந்தி எவ்வாறு இருக்கும் என்பதனைப் பட்டைக்கொள்கையின் மூலம் படம்வரைந்து விளக்குக. படத்தில் சந்தியில் பாயும் சமநிலை மின்னோட்டங்களின் திசைகளையும் காட்டுக.
2. P–N சந்தி எவ்வாறு அலைதிருத்தியாய்ப்பயன்படுகிறது என்பதனை விரிவாய்க் கூறுக. சந்தியின் திருத்திச்சமன்பாட்டைத் தருவி.
3. தடுப்பு மின்னழுத்தம், வற்றியபகுதியின் அகலம் ஆகியவற்றைக் காணப் பயன்படும் வாய்பாடுகளைத் தருவி.
4. P–N சந்தியின் மின்னழுத்த- மின்னோட்டச் சிறப்பியல்பு காண உதவும் வரையை எவ்வாறு வரைவாய்? திருப்பிய சார்பு மின்னழுத்தத்தின்போது பாயும் மின்னோட்டம், எந்தக்காரணக்கூறுகளைச் சார்ந்துள்ளது என்பதனையும் விவரி.

5. *PNP* டிரான்சிஸ்டர் எவ்வாறு உருவாகிறது? டிரான்சிஸ்டரின் மூன்றுவகை இணைப்புச்சுற்றுகளின் சிறப்பியல்புகளை விவரி.

6. டிரான்சிஸ்டர் எவ்வாறு மின்னழுத்தப் பெருக்கியாய்ச் செயல்படுகிறது என்பதை விவரி.

7. புழல் டையோடு என்றால் என்ன? பல்வேறு சார்பு அழுத்தங்களில் அவற்றின் ஆற்றல்மட்டங்கள் எவ்வாறு இருக்கும் என்பதனை வரைந்து அது செயல்படும் முறையை விளக்குக. மேலும், அதன் மின்னழுத்த-மின்னோட்டச்சிறப்பியல்பு வரையை வரைந்து விளக்குக.

8. ஜீனர் டையோடு என்றால் என்ன? அது மின்னழுத்தச் சீர்தூக்கியாய் எவ்வாறு செயல்படுகிறது என்பதனை மின்சுற்று வரைந்து விளக்குக.

9. குறைகடத்திகளில் ஒளி உட்கவரப்படுவதை விளக்குக. சூரிய ஒளிமின்கலம் எவ்வாறு செயல்படுகிறது என்பதனை விளக்குக.

10. சிறுகுறிப்பு வரைக :

    அ) வெப்பமின்தடை ஆ) தைரிஸ்டர்
    இ) ஜீனர்டையோடு ஈ) புல விளைவு டிரான்சிஸ்டர்
    உ) உலோகக்குறைகடத்தி சந்தி

மேற்கோள் நூற்பட்டியல் :

1 'Electronic Devices and Components' – J. Seymour, Longman, London, Second Edition, 1988.

2 'Introduction to Semiconductor Devices' – K.J.M. Rao, Oxford and IBH Publishing Company, New Delhi, 1977.

3. 'Electrical Engineering Materials' – A.J. Dekker, Prentice – Hall, London, 1959.

4 'Semiconductor Devices – Physics and Technology' – S.M. Sze, John Wiley and Sons, New York, 1985.

11. மின்கடத்தாப் பொருள்கள்

11.1. அறிமுகம்

காப்பான்கள் (insulators) அல்லது அரிதிற்கடத்திகள் (non-conductors) எனப்படும் மின்கடத்தாப் பொருள்கள் (dielectric materials) மின்சாரத்தைக் கடத்தாது என்பது அனைவரும் தெரிந்ததே. குறிப்பாக இங்கு நாம் மின்கடத்தாப் பொருள்களான இருமின்பொருள்களைப் பற்றி காணப்போகிறோம். இருமின் பொருள்கள் தம்மகத்தே நிலையான அல்லது தூண்டப்பட்ட மின் இருமுனைவுகளைக் கொண்டுள்ளன. எனவேதான் அவற்றை **இருமின் பொருள்கள்** (dielectrics) என அழைக்கிறோம். அனைத்து இருமின் பொருள்களும் மின்கடத்தாப் பொருள்களாகும். ஆனால் அனைத்து மின்கடத்தாப் பொருள்களையும் இரு மின்பொருள்களாய் எடுத்துக் கொள்ள முடியாது. மின்கடத்தாப் பொருள்களில் உள்ள எலெக்ட்ரான்கள் அவற்றின் மூலக்கூறுகளுடன் நன்கு இணைந்துள்ளன. அதனால், மின்கடத்தாப் பொருள்களில் கட்டற்ற மின்னூட்டக் கடத்திகள் ஏதும் இல்லை. இப்பொருள்களில் சாதாரண வெப்பநிலைகளில் வெப்பக் கிளர்ச்சியினால் எலெக்ட்ரான்கள் மூலக்கூறுகளின் இணைப்பிலிருந்து வெளிப்பட முடியாது. மேலும், சாதாரண மின்னழுத்தம் மின்னூட்டக் கடத்திகளைத் தோற்றுவிக்க முடியாது. மின் கடத்தாப் பொருள்களின் குணங்கள் அவற்றின் மின்கடத்தாப் பொருள் மாறிலி (dielectric constant)யைச் சார்ந்துள்ளது.

இந்த மின் கடத்தாப் பொருள் மாறிலி, பொருளின் அணுஇயலமைப்பினை எவ்வாறு சார்ந்துள்ளது என்பதை இவ்வத்தியாயத்தின் முதலில் காணப்போகிறோம். மேலும், இவ்வத்தியாயத்தின் நடுவில் மின்கடத்தாப்பொருள் மாறிலியின் மதிப்பு எக்காரணத்தால் மாறுகிறது என்பதனையும், இறுதியில் காப்பான்களின் குணங்களையும் அவற்றின் பயன்களையும் காண்போம். மின்கடத்தாப் பொருளில் மின்புலம் செல்வதால் ஏற்படும் மின்முனைவாக்கத்தின் (polarisation) அளவை மின்கடத்தாப்பொருள் மாறிலி வரையறுக்கிறது. பொதுவாய் ஒருபொருளின் மின்கடத்தாப்பொருள்மாறிலி, ஒருமின்தேக்கியில் (capacitor) அப்பொருளை இணைத்து, அதனால் ஏற்படும் மின்தேக்கு திறனின் மாற்றத்தின் மூலம் கணக்கிடப்படுகிறது. ஒருபொருளின் ஒப்புமை மின்மறுப்புத் திறனும் (relative permittivity), மின்கடத்தாப்பொருள் மாறிலியும் சமம்.

$$\text{பொருளின் ஒப்புமை மின்மறுப்புத் திறன் } `\varepsilon_r' = \frac{\text{பொருளின் மின்மறுப்புத் திறன் } `\varepsilon'}{\text{வெற்றிடத்தின் மின்மறுப்புத் திறன் } `\varepsilon_0'}$$

இதற்கு அலகு இல்லை. ஒரு பொருளின் மின்மறுப்புத்திறன் 'ε', அப்பொருளில் முனைவாக்கம் எவ்வளவு எளிதில் நடைபெறும் என்பதைத் தீர்மானிக்கிறது. பொருளின் மின்மறுப்புத்திறன் மிக அதிகமாய் இருந்தால் அதில் முனைவாக்கம் மிக எளிதில் நடந்து அதனால் தோன்றும் மின்புலம் பொருளினுள் செலுத்தப்பட்ட வெளி மின்புலத்தை எதிர்க்கும். எனவே வெளி மின்புலத்தின் மின்பாயம் (electric flux) பொருளினுள் நுழைய முடியாது. அஃதாவது, மின்னோட்டம் பொருளினுள் பாயாது. எனவே அவை மின்கடத்தாப் பொருள்களாய் விளங்குகின்றன.

11.2 *மின்முனைவாக்கம்* (electrical polarisation)

ஒருபடிகம் அல்லது கண்ணாடி போன்றவற்றிலுள்ள அணுக்கள் நேர்க்குறி, எதிர்க்குறி உடைய மின்னூட்டங்களைப் பெற்றிருந்தாலும், ஒவ்வோர் அணுவிலும் மின்நடுநிலைமை பாதுகாக்கப்படுவதுடன் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்களின் செறிவு ஏறத்தாழச் சுழியாயிருக்கும். இந்நிலையில் அதில் நிலைமின்புலம் ஒன்றனைச் செலுத்தினால், எதிர்க்குறியுடைய மின்னூட்டங்கள் அதன் இடத்திலிருந்து மின்புலத் திசையின் எதிர்த்திசையில் சிறிது இடம்பெயர்ந்திருக்கும். அதேபோல் அதன் நேர்க்குறியுடைய மின்னூட்டங்கள் மின்புலத் திசையில் அதன் தொடக்க நிலையிலிருந்து சிறிது இடம் பெயர்ந்திருக்கும். இம்மாதிரியாய் மின்னூட்டங்களின் இடம் பெயர்வு, அப்பொருள் முழுதும் மின் இருமுனைவுகளை (electric dipoles)த்தோற்றுவிக்கிறது. ஒரு இருமுனைவு என்பது சம மதிப்புக்களை உடையதும், எதிரெதிர் குறிகளையுடையதுமான இருமின்னூட்டங்கள் மிகக் குறைந்த தூரத்தில் தனித்தனியே பிரிக்கப்பட்டிருக்கும் தொகுதி ஆகும். இங்ஙனம் மின்கடத்தாப் பொருளில் மின்புலத்தால் மின் இருமுனைவுகள் தோன்றும் நிகழ்ச்சியே **மின்முனைவாக்கம்** எனப்படும். மேலும், மின்முனைவாக்கம் என்பதனைச் செயற்படும் மின்புலத்தின் விளைவாய் மின்கடத்தாப் பொருளில் ஏற்படும் ஒருதற்காலிக மின்திரிபு (electrical strain) எனக் கூறலாம். இங்ஙனம் அப்பொருள் மின்திரிபு அடையும்போது தூண்டப்பட்ட மின்இருமுனைவுகள் தோன்றுகின்றன.

தூண்டப்பட்ட மின்இருமுனைவு திருப்புத்திறன் (dipole moment) 'μ'வின் மதிப்பு அஃது உண்டாகக் காரணமாகிய மின்புலத்தின் செறிவு 'E'க்கு நேர் விகித்தில் உள்ளது. அஃதாவது,

$$\mu = \alpha E$$

இச்சமன்பாட்டில் மாறிலியாயுள்ள 'α' **முனைவாக்கத்திறன்** ஆகும். '$\bar{\mu}$' என்பது ஒரு மூலக்கூறில் உள்ள மின் இருமுனைவுத் திருப்புத்திறனின் சராசரி மதிப்பு எனவும், பொருளின் ஓரலகு பருமனில் உள்ள மூலக்கூறுகளின் மொத்த எண்ணிக்கை 'N' எனவும் கொண்டால், பொருளின் முனைவாக்கம், $P = N\bar{\mu}$ ஆகும். அதனால், முனைவாக்கம் என்பது ஓரலகு பருமனில் உள்ள மொத்த மின்இருமுனைவுத் திருப்புத்திறன்களாகும். இஃது ஒருவெக்டார் கணியம் ஆகும். முனைவாக்க வெக்டார் மூலம் முனைவாக்கத் திறனைக் குறிப்பிடலாம். அஃதாவது,

$$\alpha = \frac{P}{NE} = \frac{\bar{\mu}}{E}$$

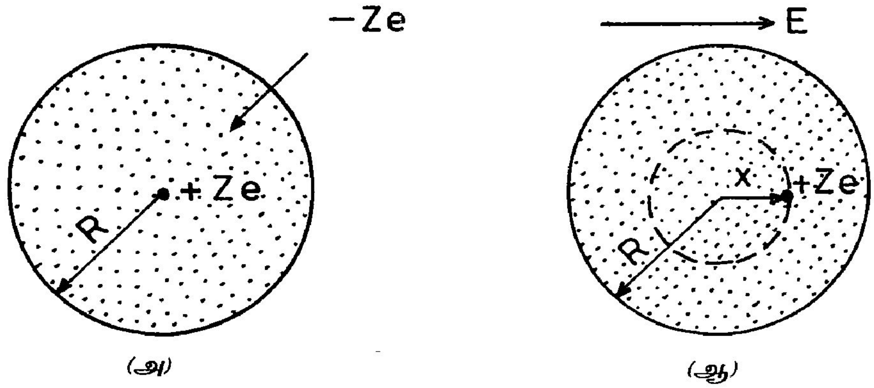
முனைவாக்கத் திறன் என்பது தூண்டப்பட்ட மின்இருமுனைவுத் திருப்புத் திறனுக்கும் அதனைத் தூண்டும் மின்புலத்திற்கும் உள்ள விகிதமாகும். பொருளில் முனைவாக்கம் பல நுண்வினையங்களால் (microscopic mechanisms) ஏற்படுகிறது. குறிப்பாய் நிலை மின்புலங்களில் நான்குவகை நுண்மின்முனைவாக்கங்களினால் பேரளவு உடைய மின்முனைவாக்க வெக்டார் தோன்றுகிறது. ஒவ்வொரு நுண்மின் முனைவாக்கத்தையும் சற்று விரிவாகக் காண்போம்.

(அ) எலெக்ட்ரானிய முனைவாக்கம் (electronic polarisation) :

ஒரு மின்புலத்தில் அணு அடையும் திரிபே எலெக்ட்ரானிய முனைவாக்கம் ஆகும். இத்திரிபினால் அணுவின் நேர்மின்னேற்றம் பெற்ற உட்கருவின் மையமும் எதிர்மின்னேற்றம் பெற்ற எலெக்ட்ரான் திரளின் மையமும் எதிர்த்திசைகளில் இடம்பெயர்கின்றன. குறிப்பாய் எலெக்ட்ரான் திரளின் மையம் மின்புலத்திசையின் எதிர்த்திசையிலும் உட்கரு மையம் மின்புலத் திசையிலும் பெயர்ச்சியடைகின்றன. இம்மாதிரியான மின்முனைவாக்கம் எல்லாப்பொருள்களிலும் உள்ளது. இம் முனைவாக்கம் பொருளிலுள்ள அணுக்களின் பருமனைச் சார்ந்துள்ளது; மேலும், அதன் மதிப்பு வெப்பநிலையைச் சார்ந்ததில்லை.

எலெக்ட்ரானிய முனைவாக்கத்திறன் மதிப்பினைக் கணக்கிடல்

ஒருமின்கடத்தாப் பொருளின் ஒருதனி அணுவினை ஒரு நிலைமின்புலம் 'E'யில் வைப்போம். அணுக்கருவும், எலெக்ட்ரான் திரளும் எதிரெதிரான மின்னூட்டங்களைப் பெற்றவை. அதனால், அவை மின்புலத்தில் எதிரெதிரான விசைகளுக்கு ஆட்படும். அணுக்கரு மின்புலத்தின் திசையிலும் எலெக்ட்ரான் திரள் அதன் நேரெதிர்த் திசையிலும் இடம்பெயரும். இங்ஙனம் நகரும்போது இவற்றினிடையே ஒரு கூலம்விசை (Coulomb force) உண்டாகிறது. இவ்விசை ஓர்ஈர்ப்பு விசையாகும். அதனால் இவ்விசை அணுக்கரு மையத்தையும், எலெக்ட்ரான் திரள் மையத்தையும் தொடக்க நிலையில் இருந்தவாறு ஒன்றாய் ஆக்க முயலும். ஆனால், அணுக்கருவும், எலெக்ட்ரான் திரளும் நிலைமின்புலத்தினால் ஏற்படும் லாரென்ஸ் விசையால் (Lorentz force) தனித்தனியாய்ப் பிரிக்கப்படும். இவ்விரு எதிர்விசைகளும் ஒன்றனுக்கொன்று சமஅளவில் இருக்கும்போது அணுக்கருவும், எலெக்ட்ரான் திரளும் ஒருசமநிலையை எய்தும். இச்சமநிலையில் அணுக்கரு மையமும், எலெக்ட்ரான் திரளின் மையமும் ஒன்றனுக்கொன்று 'x' தூரம் படம் 11.1 (ஆ)வில் காட்டியவாறு இடப்பெயர்ச்சி அடைந்ததாய்க் கொள்வோம். மேலும், இடப்



படம் 11.1 (அ) வெளி மின்புலம் இல்லாதபொழுது அணுக்கரு மையமும் எலெக்ட்ரான் திரள் மையமும் ஒன்றாகி இருத்தல்.

(ஆ) வெளி மின்புலத்தால் எலெக்ட்ரான் திரள் மையம் அணுக்கரு மையத்தோடு ஒப்பிடும்போது x அலகுகள் தூரம் பெயர்ச்சியடைகிறது. நடைமுறையில் $x << R$.

பெயர்ச்சியடையும் பொழுது எலெக்ட்ரான் திரளின் கோள உருவம் மாறாமல் பழைய நிலையிலேயே இருக்கிறதாய்க் கொள்வோம். தூண்டப்பட்ட மின் இருமுனைவின் திருப்புத்திறன்மதிப்பு

$$\mu = Ze\,x \tag{11.1}$$

இதில் Ze என்பது அணுக்கருவிலுள்ள மொத்த நேர்மின்னூட்டங்களாகும். எதிர்மின்னேற்றம் பெற்ற மின்னூட்டங்கள், ஆரம் 'R'ஐ உடைய ஒரு கோளத்தில் சீராய்ப் பரவியுள்ளன என வைத்துக்கொள்வோம். அதனால், அக்கோளத்தில் உள்ள எதிர்மின்னூட்டங்களின் அடர்த்தி $-\dfrac{Ze}{\frac{4}{3}\pi R^3}$ கூலம்/மீ^{3}. அதேகோளப்பகுதியில் 'x' என்ற ஆரமுடைய கோளத்திலுள்ள மொத்த எதிர்மின்னூட்டங்களின் எண்ணிக்கை

$$= -\frac{Ze\frac{4}{3}\pi x^3}{\frac{4}{3}\pi R^3} = -\frac{Ze\,x^3}{R^3} \tag{11.2}$$

இதிலுள்ள எதிர்க்குறி எதிர்மின்னூட்டத்தைக் குறிக்கிறது. மேலும், காஸ் தேற்றத்தின் (Gauss theroem)படி பெயர்ந்த நிலையில் உள்ள அணுக்கருமீது 'x' ஆரமுடைய கோளத்தினுள் உள்ள எலெக்ட்ரான்களே கூலம் விசையைச் செலுத்தும். அதனால், $-\dfrac{Ze\,x^3}{R^3}$ஐ பயனுறு எலெக்ட்ரான்கள் (effective electrons) என அழைக்கலாம்.

அதனால், நேர்மின்னேற்றம் பெற்ற அணுக்கருவிற்கும், 'x' தூரம் இடப்பெயர்ச்சி அடைந்த எலெக்ட்ரான் திரளுக்கும் இடையே உள்ள கூலம் ஈர்ப்புவிசை,

$$\frac{\left(\dfrac{-Ze\,x^3}{R^3}\right)(Ze)}{4\pi\varepsilon_o x^2} = -\frac{Z^2 e^2 x}{4\pi\varepsilon_o R^3} \tag{11.3}$$

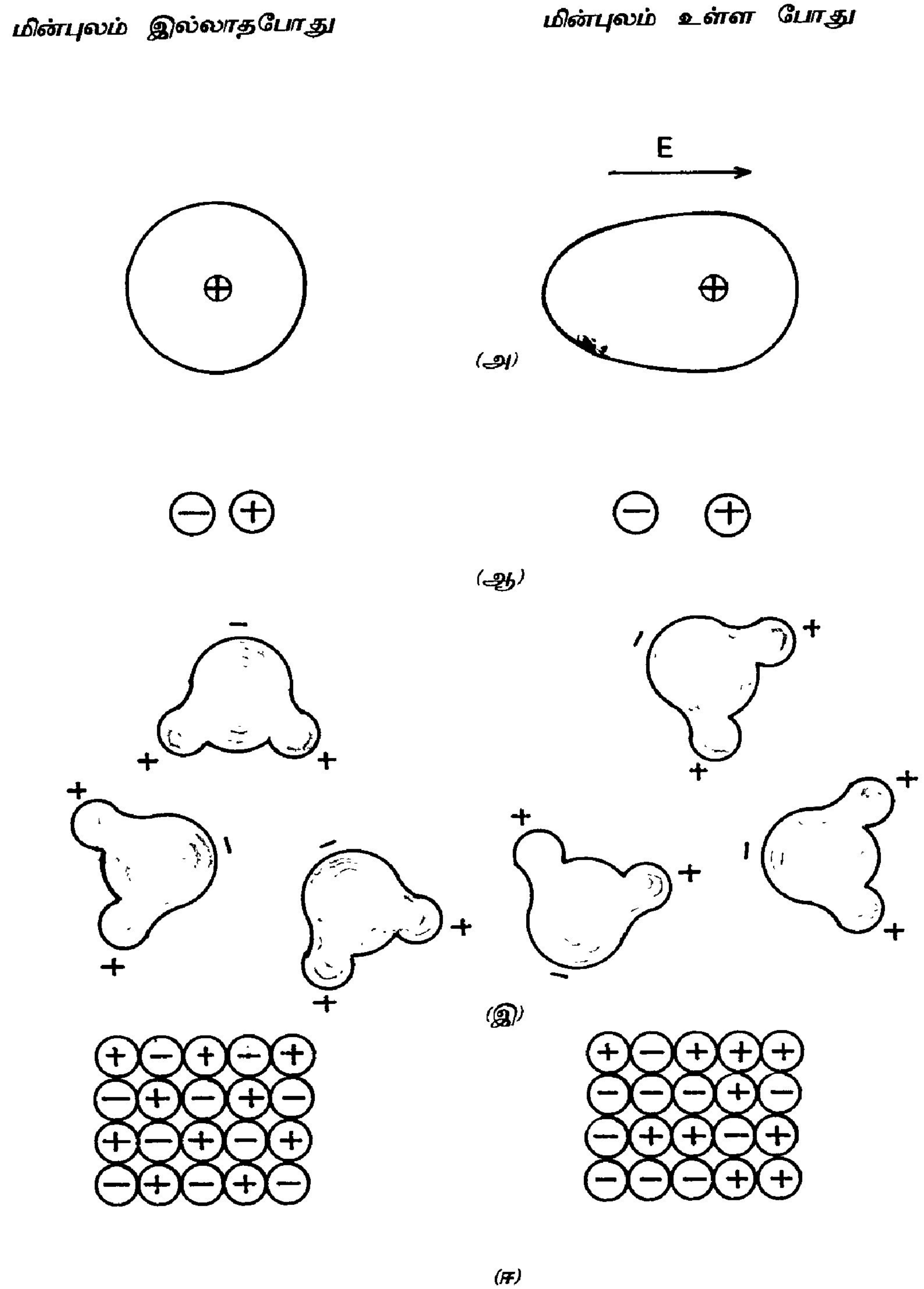
$$\text{லாரென்ஸ் விசை} = Ze\,E \tag{11.4}$$

சமநிலையில், லாரென்ஸ் விசையும், கூலம் ஈர்ப்புவிசையும் சமமாயும், எதிர்த்திசைகளில் ஆட்கொண்டும் இருக்கின்றன.

$$\therefore Ze\,E = \frac{Z^2 e^2 x}{4\pi\varepsilon_o R^3}$$

$$E = \frac{Z\,e\,x}{4\pi\varepsilon_o R^3} \tag{11.5}$$

எனவே இடப்பெயர்ச்சி அடைந்த எலெக்ட்ரான் திரளுக்கும், அணுக்கரு மையத்திற்கும் இடையே ஒரு தூண்டப்பட்ட மின் இருமுனைவு தோன்றுகிறது. அம் மின்இரு முனைவின் திருப்புத்திறனைப் பின்வருமாறும் எழுதலாம்.



படம் 11.2 பல வகை நுண் மின்முனைவாக்கங்கள் : (அ) எலெக்ட்ரானிய முனைவாக்கம் (ஆ) அயனி முனைவாக்கம், (இ) திசைமுகமாக்கு முனைவாக்கம், (ஈ) சூழ்மின்னூட்ட முனைவாக்கம்.

$$\text{திருப்புத்திறன் } `\mu' = \alpha_e E \qquad (11.6)$$

இங்கு α_e என்பது எலெக்ட்ரானிய மின்முனைவாக்கத்திறன் ஆகும். சமன்பாடு (11.1)ன் படி, $\mu = Z e x$

$$\therefore Zex = \alpha_e E$$

அதனால், எலெக்ட்ரான் திரள் இடப்பெயர்ச்சி, செயல்படுத்தப்பெறும் மின்புலத்திற்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது. சமன்பாடு (11.5) மூலம் E இன் மதிப்பினை மேலேயுள்ள சமன்பாட்டில் இட,

$$Zex = \alpha_e \frac{Zex}{4\pi \varepsilon_o R^3}$$

$$\therefore \alpha_e = 4\pi \varepsilon_o R^3 \text{ பாரடு-மீ}^2 \qquad (11.7)$$

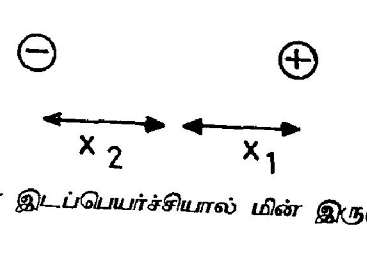
அதனால், எலெக்ட்ரானிய மின்முனைவாக்கத் திறன் அணுஆரத்தின் மூன்றுமடிக்கு அல்லது அணுவின் பருமனுக்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது.

(ஆ) அயனி முனைவாக்கம் (ionic polarisation)

அயனிப் பொருள்களில் மின்புலத்தால் ஏற்படும் திரிபே அயனி முனைவாக்கம் ஆகும். இப்பொருள்களிலும் மின்புலத்தால் எதிர்மின் அயனிகளும், நேர்மின் அயனிகளும் எதிரெதிர் திசைகளில் நகருகின்றன. இந்தவிதமான இடப்பெயர்ச்சி பொதுவாய் வெப்பநிலையைச் சார்ந்திருப்பதில்லை. மேலும், சக பிணைப்புடைய வைரம் போன்ற பொருள்களில் இவ்வித இடப்பெயர்ச்சி உண்டாவதில்லை. படம் 11.2 (ஆ)வில் காட்டியுள்ளவாறு மின்புலம் நேர்க்குறியுடைய 'x' திசையில் செலுத்தப்படுவதாய்க் கொள்வோம். அதனால், அயனிப் பிணைப்புடைய ஒருமூலக்கூறில் நேர்மின்அயனி மின்புலத்திசையிலும் எதிர்மின்அயனி மின்புலத் திசைக்கு எதிர்த் திசையிலும் இடப்பெயர்ச்சியடைகின்றன.

அயனி முனைவாக்கத் திறன் கணக்கிடல்

அயனிப் படிகத்தின் அலகு செல்லில் நேர்மின்னூட்டம் பெற்ற ஓர்அயனியும், எதிர்மின்னூட்டம்பெற்ற ஓர் அயனியும் அயனிப்பிணைப்பில் இருப்பதாய்க் கொள்வோம். இதில் மின்புலத்தினால் தூண்டப்பட்ட மின் இருமுனைவு தோன்றும். எனவே அலகு



படம் 11.3 அயனிகளின் இடப்பெயர்ச்சியால் மின் இருமுனைவு தோன்றுதல்.

செல்லில் தூண்டப்பட்ட திருப்புத்திறனின் மதிப்பு

$$\mu = e\,(x_1 + x_2) \tag{11.8}$$

இதில் 'x_1' என்பது நேர்மின் அயனியின் இடப்பெயர்ச்சித் தூரத்தையும் 'x_2' என்பது எதிர்மின் அயனியின் இடப்பெயர்ச்சித் தூரத்தையும் குறிக்கின்றன.

நிலைமின்புலத்தால் ஏற்படும் மின்விசை 'F' எனவும், நேர்மின் அயனியில் ஏற்படும் மீட்பு விசை (restoring force) $\beta_1 x_1$ எனவும், எதிர்மின் அயனியில் ஏற்படும் மீட்புவிசை $\beta_2 x_2$ எனவும் கொள்வோம். இங்கு 'β' என்பது மீட்புவிசை மாறிலியாகும். அஃது அயனியின் நிறையையும், இவ்வயனிகள் இருக்கும் மூலக்கூறின் இயற்கோண அதிர்வெண்ணின் (natural angular frequency) இருமடியையும் சார்ந்துள்ளது. அதனால்,

$$\text{சமநிலையில்,}\quad F = \beta_1 x_1 = \beta_2 x_2$$

$$x_1 = \frac{F}{\beta_1} = \frac{eE}{m\,\omega_o^2} \tag{11.9}$$

இதில் 'm' என்பது நேர்மின் அயனியின் நிறையாகும். மேலும் இதில் $F = eE$ மற்றும் $\beta_1 = m\,\omega_o^2$ ஆகும். $\beta_2 = M\,\omega_o^2$ எனக்கொண்டால்,

$$x_2 = \frac{eE}{M\,\omega_o^2} \tag{11.10}$$

இதில் 'M' என்பது எதிர்மின் அயனியின் நிறையாகும்.

$$\therefore\ (x_1 + x_2) = \frac{eE}{\omega_o^2}\left(\frac{1}{m} + \frac{1}{M}\right)$$

எனவே

$$\mu = e(x_1 + x_2) = \frac{e^2 E}{\omega_o^2}\left(\frac{1}{m} + \frac{1}{M}\right) \tag{11.11}$$

$$\text{ஆனால்,}\quad \mu = \alpha_i E$$

இதில் α_i என்பது அயனி முனைவாக்கத்திறனாகும்.

எனவே,

$$\alpha_i = \frac{\mu}{E} = \frac{e^2}{\omega_o^2}\left(\frac{1}{m} + \frac{1}{M}\right) \tag{11.12}$$

அயனி முனைவாக்கம், அயனிப் பொருள்களின் மூலக்கூறின் இயல் அதிர்வெண்ணின் இருமடிக்கும், அதன் சுருக்கிய நிறை (reduced mass)க்கும் எதிர்விகிதத்தில் உள்ளது. சுருக்கிய நிறை 'm_e'யைப் பின்வருமாறு எழுதலாம்.

$$\frac{1}{m_e} = \frac{1}{m} + \frac{1}{M}$$

(இ) திசை முகமாக்கு முனைவாக்கம் (orientational polarisation)

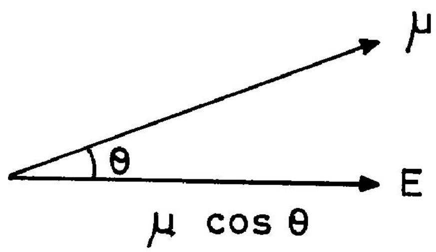
பலதிசைகளில் நிலைகொண்டிருக்கும் (orient) நிலையானமின்இருமுனைவுகளை உடைய பொருளின்மீது நிலைமின்புலம் செயல்படும் போது, மின்புலம் தன் திசையில் இருமுனைவுகளைத் திருப்ப முயல்வதால் ஏற்படும் பயனுறு இருமுனைவு திருப்புத் திறனின் விளைவே திசைமுகமாக்கு முனைவாக்கம் எனப்படும். இவ்வித முனைவாக்கம் மின்கடத்தாப் பொருள்களில் முனைவு மூலக்கூறு (polar molecule) இருப்பதால் வருகிறது. முனைவு மூலக்கூறுகளில் நிலையான மின்இருமுனைவுகள் உள்ளன.

முதலில் முனைவு மூலக்கூறுகள், முனைவு இல்லா மூலக்கூறுகள் (non polar molecules) பற்றிச் சிறிது காண்போம். முனைவு மூலக்கூறுகளாய HCl, CO, H_2O ஆகியவற்றில் நிலையான மின்இருமுனைவுகள் உள்ளன. அவை அகச்சிவப்புக் கதிர்களை உட்கவரவோ, உமிழவோ செய்கின்றன. ஆனால், முனைவு இல்லா மூலக்கூறுகளாய O_2 மற்றும் H_2 ஆகியவற்றில் நிலையான மின்இருமுனைவுகள் இல்லை. அவை அகச் சிவப்புக் கதிர்களை உட்கவரவோ, உமிழவோ செய்யாது. முனைவு மூலக்கூறுகளில் ஏற்படும் முனைவாக்கம் வெப்பநிலையை மிகுதியாய்ச் சார்ந்துள்ளது. ஆனால், முனைவு இல்லா மூலக்கூறுகளில் ஏற்படும் முனைவாக்கம் வெப்பநிலையைச் சார்ந்தது அன்று. இக்குணத்தை வைத்து, முனைவு மூலக்கூறுகளையும், முனைவு இல்லா மூலக்கூறுகளையும் வேறுபடுத்திக்காண்பிக்கலாம்.

நிலையான இருமுனைவுகள் உள்ள முனைவு மூலக்கூறுகள், தங்களது நிலைஆற்றலைக் குறைத்து, மின்புலத் திசைக்கு இணையாய்த் தங்களை அமைத்துக் கொள்கின்றன. இந்நிகழ்ச்சி ஒரு வெளிக்காந்தப் புலத்தில் அணுக்களின் நிலையான காந்தத் திருப்புத்திறன்களைத் திசைமுகமாக்குதல் போல் உள்ளது. காந்தவியலில் இந்நிகழ்ச்சியால் பாராக் காந்தம் வருகிறது. பாராக்காந்தம் வெப்பநிலையைச் சார்ந்துள்ளதுபோல் திசைமுகமாக்கு முனைவாக்கமும் வெப்பநிலையைச் சார்ந்துள்ளது.

திசைமுகமாக்கு முனைவாக்கத் திறனைக் கணக்கிடல்

ஓரலகு பருமனுடைய பொருளில் 'N' இருமுனைவுகள் உள்ளனவாகவும், ஒவ்வொரு மின் இருமுனைவுத் திருப்புத்திறன் 'μ' எனவும் கொள்வோம். வெளிமின்புலம் ஏதும் செயல்படாத நிலையில் வெப்பக் கிளர்ச்சியின் காரணமாய் இத்திருப்புத்திறன்களின் திசைகள் தம்மிச்சையாய் எல்லாத் திசைகளிலும் பகிர்ந்துள்ளன. இந்நிலையில் திருப்புத் திறன்களின் வெக்டார் கூட்டல் சுழியாகும். அதனால், மின் முனைவாக்கமும் சுழியாகும். செயற்படும் மின்புலத்தினால் மின்புலத்தின் திசையில் திருப்புத்திறன்கள் தங்களைத் திருப்ப முயல்கின்றன. அதேசமயத்தில் வெப்ப ஆற்றல் (kT) மின்புலத்தின் திசையில் அமைத்திருக்கும் திருப்புத்திறனிகளின் சீரான நிலையைக் குலைக்க முயலும். மாக்ஸ்வெல்-போல்ட்ஸ்மேன் புள்ளியியலைப் பயன்படுத்தி ஒருமின் இருமுனைவு வெப்பச் சமநிலையில் வெளிமின்புலத்திற்கு 'θ' டிகிரியில் நிலைக்கொண்டிருப்பதற்குரிய நிகழ் தகவை கண்டுபிடிக்கலாம். இந்நிகழ் தகவு $\exp(\mu E \cos\theta / kT)$க்கு நேர்விகிதத்தில் இருக்கும். இதில் $\mu E \cos\theta$ என்பது மின்புலத்தில் மின் இருமுனைவின் நிலை ஆற்றலாகும்.



படம் **11.4** மின்புலத்திற்கும் இருமுனைவு திருப்புத் திறனுக்கும் இடையே உள்ள கோணம் 'θ'வைக் காட்டும் படம்.

'n_o' என்பது பொருளில் உள்ள மொத்த இருமுனைவுகள் எனக்கொண்டால் 'n' என்பது வெளிமின்புலத்திற்குக் கோணம் 'θ' அளவில் நிலை கொண்டிருக்கும் இருமுனைவுகள் ஆகும். அதனை n_o மூலம் பின்வருமாறு எழுதலாம்.

$$n = n_o \exp(\mu E \cos\theta / kT)$$

இதனை வகையிட,

$$dn = -n_o \exp(\mu E \cos\theta / kT)\left(\frac{\mu E}{kT}\right)\sin\theta\, d\theta$$

இதனால், வெளிமின்புலத் திசையில் உள்ள சராசரி மின்

இருமுனைவின் திருப்புத் திறன்

$$\bar{\mu} = \frac{\text{வெளிமின்புல திசையின்கண் பகுக்கப்பட்ட மின் இரு முனைவுத் திருப்புத் திறன்கூறுகளின் கூட்டுத்தொகை}}{\text{பொருளின் மொத்த மின்இருமுனைவுகள்}}$$

அஃதாவது, $\bar{\mu} = \dfrac{\int \mu \cos\theta\, dn}{\int dn}$

இதில் dn இன் மதிப்பினை இட, $\bar{\mu} = \dfrac{\int \mu \cos\theta \exp(\mu E \cos\theta/kT) \sin\theta\, d\theta}{\int \exp(\mu E\cos\theta/kT)\sin\theta\, d\theta}$

$\beta = \mu E/kT$ என்று வைத்துக்கொண்டு θவினுடைய வரம்புகளைத் தொகையத்தில் இட,

$$\bar{\mu} = \frac{\int_o^{\pi} \mu \cos\theta \exp(\beta\cos\theta)\sin\theta\, d\theta}{\int_o^{\pi} \exp(\beta\cos\theta)\sin\theta\, d\theta}$$

$\cos\theta = x$ என வை. இதனை வகையிட, $-\sin\theta\, d\theta = dx$.

$$\therefore \overline{\mu} = \frac{\int_{-1}^{1} \mu\, x \exp(\beta x)\, dx}{\int_{-1}^{1} \exp(\beta x)\, dx} \qquad (11.13)$$

இச் சமன்பாட்டின் மேல்தொகையத்தையும், கீழ்த் தொகையத்தையும் தனித் தனியாய்த் தீர்ப்போம் :

$$\int_{-1}^{1} x \exp(\beta x)\, dx = \int_{-1}^{1} x\, d\left(\frac{\exp(\beta x)}{\beta}\right) = \left[\frac{x\, e^{\beta x}}{\beta}\right]_{-1}^{1} - \int_{-1}^{1} \frac{e^{\beta x}\, dx}{\beta}$$

$$= \left[\frac{x\, e^{\beta x}}{\beta} - \frac{e^{\beta x}}{\beta^2}\right]_{-1}^{1} = \left(\frac{e^{\beta}}{\beta} - \frac{e^{\beta}}{\beta^2}\right) - \left(\frac{-e^{-\beta}}{\beta} - \frac{e^{-\beta}}{\beta^2}\right)$$

$$= \frac{1}{\beta}(e^{\beta} + e^{-\beta}) - \frac{1}{\beta^2}(e^{\beta} - e^{-\beta}) = \frac{2}{\beta}\cosh\beta - \frac{2}{\beta^2}\sinh\beta$$

மேலும், $\int_{-1}^{1} \exp(\beta x)\, dx = \left[\frac{e^{\beta x}}{\beta}\right]_{-1}^{1} = \frac{1}{\beta}(e^{\beta} - e^{-\beta}) = \frac{2}{\beta}\sinh\beta$

தொகையங்களின் மதிப்புகளைச் சமன்பாடு (11.13) இல் இட,

$$\overline{\mu} = \frac{\mu\left(\frac{2}{\beta}\cosh\beta - \frac{2}{\beta^2}\sinh\beta\right)}{\frac{2}{\beta}\sinh\beta} = \mu\left(\coth\beta - \frac{1}{\beta}\right)$$

$$\text{இங்கு, } \coth\beta = \frac{\cosh\beta}{\sinh\beta} = \frac{e^{\beta} + e^{-\beta}}{e^{\beta} - e^{-\beta}}$$

$$\therefore \overline{\mu} = \mu\, L(\beta)$$

இங்கே $L(\beta)$ என்பது $\left(\coth\beta - \frac{1}{\beta}\right)$க்குச் சமம். இதனை இலாஞ்சுவின் சார்பு (Langevin function) என்பர்.

நேர்வு 1:

βவின் மதிப்பு மிகஅதிகமானதாய் எடுத்துக்கொள்வோம். அஃதாவது, $\mu E >> kT$ அல்லது $\beta \to \infty$. இந்நிலையில் 'E' இன் மதிப்பு மிகமிக உயர்வாயிருக்க வேண்டும். அல்லது 'T' இன் மதிப்பு மிகமிகத் தாழ்வாயிருக்க வேண்டும். இங்ஙனம் இருக்கும்போது ஒழுங்கான

அமைப்பு ஏற்படுத்தும் மின்புல விளைவு, ஒழுங்கான அமைப்பினைக் குலைக்க முயலும் வெப்ப விளைவை விட மிகமிக அதிகமாயிருக்கும்.அதனால், எல்லா இருமுனைவுகளின் திருப்புத் திறன்கள் மின்புலத் திசையில் நிலைகொண்டிருக்கும். இதனையே கணக்கீடு (calculation) மூலமும் நிரூபிக்கலாம்.

$$\left[\coth\beta - \frac{1}{\beta}\right]_{\beta\to\infty} = \left[\frac{e^{\beta}+e^{-\beta}}{e^{\beta}-e^{-\beta}} - \frac{1}{\beta}\right]_{\beta\to\infty} = \left[\frac{1+e^{-2\beta}}{1-e^{-2\beta}} - \frac{1}{\beta}\right]_{\beta\to\infty} = 1$$

$$\therefore \overline{\mu} = \mu$$

ஓரலகு பருமனில் உள்ள மொத்த இருமுனைவுகள் 'N' என எடுத்துக்கொண்டுள்ளோம்.

அதனால், திசைமுகமாக்கு முனைவாக்கம், $P_o = N\overline{\mu} = N\mu = P_{os}$

இதில் P_{os} என்பது தெவிட்டிய (saturation) திசைமுகமாக்கு முனைவாக்கமாகும்.

நேர்வு 2 :

நடைமுறையில் செயல்படும் வெப்பநிலையும், மின்புலமும் எம் மதிப்புடையனவாய் அமைவதால், நேர்வு 1இல் கண்ட நிபந்தனை உண்மையில் எய்துவதில்லை. அதனால்,

$$\beta << 1 \quad \text{அல்லது} \quad \beta \longrightarrow 0$$

என்பதுதான் உண்மையில் இருக்கும். மேற்கண்ட நிபந்தனையின்படி $\mu E << kT$. இந் நேர்விற்கு, இலாஞ்சுவின் சார்பு மதிப்பினைப் பின்வருமாறு கணக்கிடலாம்.

$$[L(\beta)]_{\beta\to 0} = \left[\frac{e^{\beta}+e^{-\beta}}{e^{\beta}-e^{-\beta}} - \frac{1}{\beta}\right]_{\beta\to 0}$$

βவின் மதிப்பு மிகக்குறைவாயிருப்பதால், $e^{\beta}, e^{-\beta}$ ஆகியவற்றை விரித்தெழுதி, அதில் முதல்நான்கு உறுப்புகளைமட்டும் எடுத்துக்கொள்வோம்.

$$[L(\beta)]_{\beta\to 0} = \left[\frac{1+\beta+\frac{\beta^2}{2!}+\frac{\beta^3}{3!}+1-\beta+\frac{\beta^2}{2!}-\frac{\beta^3}{3!}}{1+\beta+\frac{\beta^2}{2!}+\frac{\beta^3}{3!}-1+\beta-\frac{\beta^2}{2!}+\frac{\beta^3}{3!}} - \frac{1}{\beta}\right]_{\beta\to 0}$$

$$= \left[\frac{2+\beta^2}{2\beta+\frac{2\beta^3}{3!}} - \frac{1}{\beta}\right]_{\beta\to 0}$$

$$= \left[\frac{2\left(1+\frac{\beta^2}{2}\right)}{2\beta\left(1+\frac{\beta^2}{6}\right)} - \frac{1}{\beta}\right]_{\beta\to 0}$$

இதில் $\left(1+\frac{\beta^2}{6}\right)^{-1}$ ஐ விரித்து எழுதி அதில் முதல் இருஉறுப்புகளை மட்டும் பயன்படுத்துவோம்.

$$[L(\beta)]_{\beta\to 0}=\left[\frac{1}{\beta}\left(1+\frac{\beta^2}{2}\right)\left(1-\frac{\beta^2}{6}\right)-\frac{1}{\beta}\right]_{\beta\to 0}$$

$$=\frac{\beta}{3}=\frac{\mu E}{3kT}$$

$$\therefore \bar{\mu}=\frac{\mu^2 E}{3kT}$$

எனவே, பொருளின் திசைமுகமாக்கு முனைவாக்கம் $=P_0=N\bar{\mu}=\dfrac{N\mu^2 E}{3\,kT}$

$$\text{(அல்லது) திசைமுகமாக்கு முனைவாக்கத் திறன் } =\alpha_0=\frac{P_0}{NE}=\frac{\mu^2}{3\,kT} \qquad (11.14)$$

மேற்கண்ட சமன்பாட்டின்படி, திசைமுகமாக்கு முனைவாக்கத்திறன் வெப்பநிலைக்கு எதிர்விகிதத்தில் உள்ளது. அதனால், வெப்பநிலை கூடினால் அதன் மதிப்பு குறைகிறது.

(ஈ) **சூழ்மின்னூட்ட முனைவாக்கம்** (space-charge polarisation) :

பொதுவாய் இத்தகைய முனைவாக்கம், மின்னூட்டங்கள் மின்வாய்களிலும், இடைத்தளங்களிலும் (interfaces) சூழ்ந்துகொள்வதால் வருகிறது. இது பலகட்ட மின்கடத்தாப் பொருள்களில் (multi phase dielectrics) மட்டும் நடைபெறுகிறது. பலகட்ட மின்கடத்தாப்பொருள்களில் ஒருகட்டத்தில் மற்றொரு கட்டத்தைவிட அதிகமான மின் எதிர்ப்புத் திறன் இருக்கும்போதுதான் இவ்வகை முனைவாக்கம் ஏற்படுகிறது. அதனால், ஃபெரைட்டுகளிலும் குறைகடத்திகளிலும் இவ்வகை முனைவாக்கம் நடைபெறுகிறது. மற்றைய முனைவாக்கத் திறன்களோடு ஒப்பிடும்போது சூழ்மின்னூட்ட முனைவாக்கத் திறன் மதிப்பு மிகமிகக் குறைவு. ஆகையால் மொத்த முனைவாக்கத்திறன் கணக்கிடும்போது சூழ்மின்னூட்ட முனைவாக்கத் திறனை நீக்கிவிடலாம்.

∴ மொத்த முனைவாக்கத் திறன்,

$$\alpha=\alpha_e+\alpha_i+\alpha_o \qquad (11.15)$$

இதில் α_e = எலெக்ட்ரானிய முனைவாக்கத் திறன்;

α_i = அயனி முனைவாக்கத் திறன்;

α_o = திசைமுகமாக்கு முனைவாக்கத்திறன்.

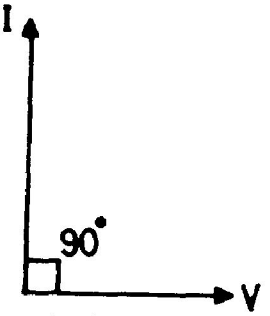
மொத்த முனைவாக்கம், $P=N\alpha E=NE(\alpha_e+\alpha_i+\alpha_o)$

அஃதாவது, $$P = NE\left[4\pi\varepsilon_o R^3 + \frac{e^2}{\omega_o^2}\left(\frac{1}{m}+\frac{1}{M}\right) + \frac{\mu^2}{3kT}\right] \quad (11.16)$$

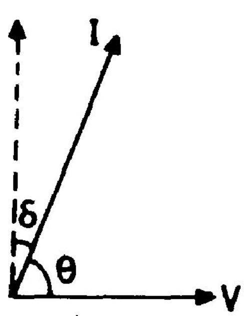
இச்சமன்பாடு இலாஞ்சுவின்-டிபைச் சமன்பாடு (Langevin-Debye) ஆகும்.

11.3 வெப்பநிலையாலும், மின்புல அதிர்வெண்ணாலும் முனைவாக்கத்தில் ஏற்படும் மாறுதல்கள்

மாறுதிசை மின்புலங்களில் மின்கடத்தாப் பொருள்களில் நடைபெறும் முனைவாக்கம் மின்புலத்தின் அதிர்வெண்ணைச் சார்ந்துள்ளது. அஃதாவது, நேரத்திற்கு ஏற்ப முனைவாக்க மதிப்பும் மாறுகிறது. பொதுவாய் எலெக்ட்ரானிய முனைவாக்கம் மிகவிரைவில் நடைபெறும் ஒன்றாகும். அதனால் மின்னழுத்தத்தின் அதிர்வெண் மிக அதிகமாய் இருந்தாலும் எலெக்ட்ரானிய முனைவாக்கம் பொருளில் நிறைவுற்று விடுகிறது. ஆனால், அயனி முனைவாக்கம் மிகமெதுவாய் நடைபெறும் ஒன்றாகும். அதனால், மின்னழுத்தத்தின் அதிர்வெண் கண்ணுறு ஒளிப்பகுதியில் இருந்தால் அயனிகளில் ஒருமாற்றமும் ஏற்படாது. அஃதாவது, இடப்பெயர்ச்சி ஏதும் இராது. ஏனெனில், மின்புலம் ஒவ்வொரு முறையும் தலைகீழாகும்போது அயனிகள் தங்களை மின்புலத்திற்கு ஏற்ப மறுநிலைப் படுத்திக்கொள்வதற்குள் மின்புலம் நேராய் மாறிவிடுகிறது. இந் நிகழ்ச்சியை நாம் மீட்சியுறாச் செயல்முறைக்கு ஒப்பிடலாம். இதனால், ஆற்றலிழப்பு ஏற்படுகிறது. இதனைப் பின்வருமாறு விளக்கலாம்(படம் 11.5).



(அ) குறையில்லா இலக்கணம் வாய்ந்த மின்தேக்கி



(ஆ) மின்கடத்தாப்பொருள் இழப்பு உள்ள மின்தேக்கி

படம் 11.5 ஒரு மின்தேக்கியில் மின்னோட்டம் மின்னழுத்தத்தை விட 90° – க்குக் குறைவான கட்ட வேறுபாட்டில் முன்னேறியிருந்தால் மின்னிழப்பு உண்டாவதைக் காட்டும் படம்.

ஒருமாறுதிசை சைன்வடிவ மின்னழுத்தம் 'V'யை ஒருமின்தேக்கியில் செலுத்துவோம். 'V'யை $V_o \cos \omega t$ என எழுதலாம். 'V_o' என்பது பெரும மின்னழுத்தம்; 'ω' என்பது கோண அதிர்வெண்; 't' என்பது நேரம். ஒருகுறையில்லா இலக்கணம் வாய்ந்த

மின்தேக்கியில் முனைவாக்கம் உடனே நடப்பதுடன் மின்னேற்ற மின்னோட்டம் (charging current) மின்னழுத்தத்தை விட 90° கட்ட வேறுபாட்டில் முன்னேறியிருக்கும். அதனால், மின்னேற்றத்தின்போது மின்ஆற்றல் இழப்பு ஏதும் இல்லை. இதே போல் வெளிமின்னழுத்தத்தின் உயர்அதிர்வெண் காரணமாய் முனைவாக்கம் நடைபெறாதபோதும் மின்னோட்டம் மின்னழுத்தத்தைவிட 90° முன்னேறியிருக்கும். முனைவாக்கம் ஏற்படும் பொருள்களில் தளர்நேரம் (relaxation time) உண்டு. **தளர்நேரம்** என்பது ஒருபொருள் மாறுமின்புலத்தினால் அதன் சமநிலையிலிருந்து விலகி, மறுபடியும் சமநிலைக்கு வர எடுத்துக்கொள்ளும் நேரமாகும்.

முனைவாக்கச் செயல்முறைகளில் தளர்நேரம் மாறுமின்னழுத்தத்தின் அலைவுநேரத்திற்கு ஏறத்தாழச் சமமாயிருக்கும்போது ஒத்திசைவு (resonance) உண்டாகிறது. அதனால், படத்தில் காட்டியவாறு மின்னோட்டம் மின்னழுத்தத்தை விட (90 – δ) டிகிரியில் முன்னேறியிருக்கும். இங்கு 'δ' என்பது **இழப்புக் கோணம்** (loss angle) ஆகும். அஃது ஓர்அலைவில் ஏற்படும் ஆற்றலிழப்பை அளக்கும் அளவுகோலாய் உள்ளது. அதனால், மின்கடத்தாப் பொருள் இழப்பு (dielectric loss) அல்லது மின்கடத்தாப்பொருளில் ஆற்றல் உட்கவரப்படுதல் (absorption) அல்லது மின்னிழப்பு என்பது தளர் நேரமும் மாறுதிசை மின்னழுத்த அலைவுநேரமும் சமமாயிருக்கும்போது பெரும அளவில் இருக்கும். அதனால், மின்கடத்தாப் பொருள் இழப்புகள் உயர்அதிர்வெண்களில் வருதற்கு (படம் 11.7)க் காரணம், குறிப்பாய் மின் இருமுனைவு சுழற்சி (dipole rotation)யும், அயனிப் பெயர்வுகளும் ஆகும். குறைந்த அதிர்வெண்களில் மின்னிழப்பு ஏற்படுதற்கு முக்கியக் காரணம் பொருளின் நேர்த்திசை மின் எதிர்ப்புத் திறன் (d.c.resistivity) ஆகும். மேலும் கண்ணுறுஒளி அதிர்வெண்களில் ஆற்றலிழப்புகளுக்குக் காரணம் எலெக்ட்ரான்களாகும். இதனையே ஒளி உட்கவருதல் (optical absorption) என்பர். இதுவே பொருள்களுக்கு நிறத்தை வழங்குகிறது. எனினும், குறைந்த அதிர்வெண்களில் எலெக்ட்ரானிய முனைவாக்கத்தால் ஏற்படும் மின்னிழப்பு மிகக்குறைவு. திசைமுகமாக்கு முனைவாக்கத்தில் முனைவு மூலக்கூறுகள், தங்களை ஒருதிசை முகப்புநிலைக்குக் கொண்டுவர, அயனி முனைவாக்கத்தைவிட மிக்க நேரம் எடுத்துக் கொள்கின்றன. அதனால் இவ்வகை முனைவாக்கம் அகச்சிவப்பு அதிர்வெண்களைவிடக் குறைவாயுள்ள மின் அதிர்வெண்களில் (electrical frequencies) மட்டும் உண்டாகிறது. சூழ்மின்னூட்ட முனைவாக்கம் அனைத்து முனைவாக்க முறைகளைவிட மிகமிக மெதுவாய் ஏற்படும் முனைவாக்கம் ஆகும். அதனால், அது திறன்அதிர்வெண்களில் (50-60 செகண்டு$^{-1}$) மட்டும் ஏற்படும். மின்கடத்தாப்பொருள்இழப்புகள் பற்றியும், மின்னழுத்தமும், மின்னோட்டமும் எங்ஙனம், மின்னிழப்பு இல்லா மின்கடத்தாப் பொருள்களில் சரியாய் 90° கட்ட வேறுபாட்டில் உள்ளதுபற்றியும் சற்று விரிவாய்க் காண்போம்.

மின்னிழப்புள்ள மின்கடத்தாப் பொருளின் ஒப்புமை மின்மறுப்புத்திறனைச் சிக்கல் கணியமாய் (complex quantity)க்கொண்டு அதனைப் பின்வருமாறு எழுதலாம்.

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon_r' - j\,\varepsilon_r'' \qquad (11.17)$$

இதில் ε_r' மெய்ப்பகுதி; ε_r'' கற்பனைப் பகுதியாகும்.

மாறுதிசை மின்புலமொன்றில்மின்பாய அடர்த்தி (D)யும், மின்னோட்ட அடர்த்தி (J)யும் ஒன்றனையொன்று சார்ந்துள்ளவைகளாகும். ஏனெனில், மின்பாய அடர்த்தி D(t) அப்பொருளின் மின்னூட்ட அடர்த்தி $Q(t)$க்குச் சமமாகும். அஃதாவது,

$$J(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{dD(t)}{dt}$$

மாறுதிசை மின்புலச் செறிவு $E(t) = E_o\, e^{j\omega t}$ –இன் மெய்ப்பகுதியாகும்.

அஃதாவது, $E(t) \quad = \quad$ மெய் $(E_o\, e^{j\omega t})$

மேலும் $\quad \overrightarrow{D} \quad = \quad \varepsilon_o\, \varepsilon_r\, \overrightarrow{E}$

$D(t) \quad = \quad \varepsilon_o\, E_o$ மெய் $(\varepsilon_r^*\, e^{j\omega t}) = \varepsilon_o\, E_o$ மெய் $[(\varepsilon_r' - j\varepsilon_r'')\, e^{j\omega t}]$

$$J(t) = \frac{dD(t)}{dt} = \varepsilon_o\, E_o\, \omega(\varepsilon_r'' \cos \omega t - \varepsilon_r' \sin \omega t) \qquad (11.18)$$

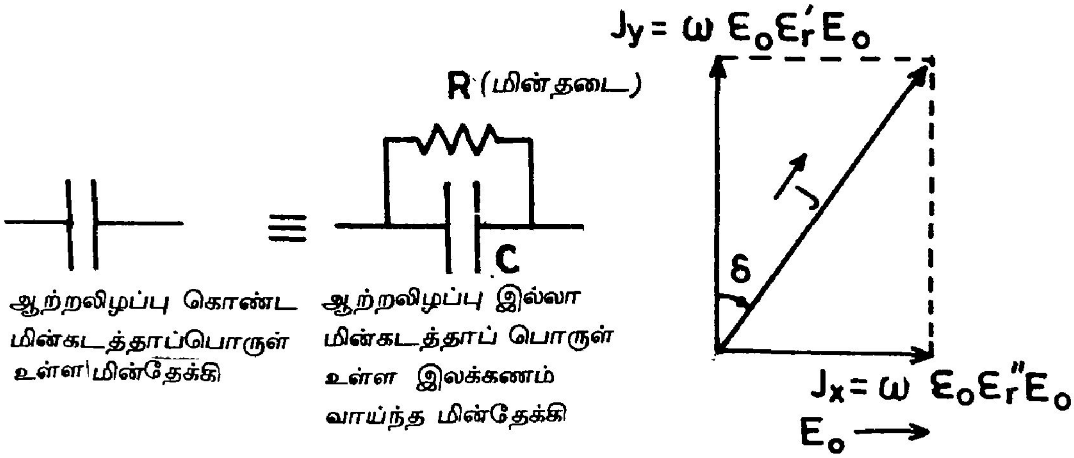
அதில் $\varepsilon_r'' \cos \omega t$ மின்புலத்தோடு ஒன்றிய கட்டத்திலுள்ள பகுதியாகும். $\varepsilon_r' \sin \omega t$ என்பது மின்புலத்தோடு விலகிய (90°) கட்டப் பகுதியாகும். ஆற்றலிழப்பு இல்லாததும் இலக்கணம் வாய்ந்ததுமான ஒருமின்கடத்தாப் பொருளில் ஒப்புமை மின்மறுப்புத்திறனின் கற்பனைப் பகுதி, ε_r'' சுழியாயிருக்கும். அதனால்,

$$J(t) = \varepsilon_o\, E_o\, \omega\, \varepsilon_r' \cos(\omega t + 90°) \qquad (11.19)$$

மேற்கண்டசமன்பாட்டின்படி ஆற்றலிழப்பு இல்லா மின்கடத்தாப் பொருள்களில் மின்னோட்ட அடர்த்தி $J(t)$ மின்புலச் செறிவைவிட 90° கட்ட வேறுபாட்டில் முன்னேறியிருக்கிறது. அஃதாவது, மின்னோட்டம், மின்னழுத்தத்தைவிட 90°யில் முன்னேறி நிலைகொண்டிருக்கும். ஆனால், மின்னழுத்தத்தோடு ஒன்றிய கட்டத்தில் ஏதாவது மின்னோட்டக்கூறு அமைந்திருந்தால், பின் அம்மின்னோட்டத்தின் தொகைபயன் மின்னழுத்தத்தோடு 90° கட்ட வேறுபாட்டிற்குப் பதிலாய் (90° – δ) கட்ட வேறுபாட்டில் முன்னேறியிருக்கும். மேலும் அம்மின்கடத்தாப் பொருள் ஆற்றலிழப்பு கொண்டதாகும்.

மின்ஆற்றலிழப்பு ஏற்படுதற்கு முக்கியக் காரணம், மின்புலச்செறிவு வெக்டாருடன் ஒன்றிய கட்டத்தில் உள்ள மின்னோட்ட அடர்த்தியின் கூறு, $\omega\, \varepsilon_o\, \varepsilon_r''\, E_o$ (படம் 11.6 (ஆ)) ஆகும்.

எனவே ஒருமின் கடத்தாப் பொருளின் சிக்கல் ஒப்புமை மின்மறுப்புத்திறனின் கற்பனைப்பகுதி ε_r'' சுழியாயிருந்தால் ஆற்றலிழப்பு ஏதும் இராது. அஃதாவது, $\tan \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'}$. எனவே $\varepsilon_r'' = 0$ எனில் $\delta = 0$.

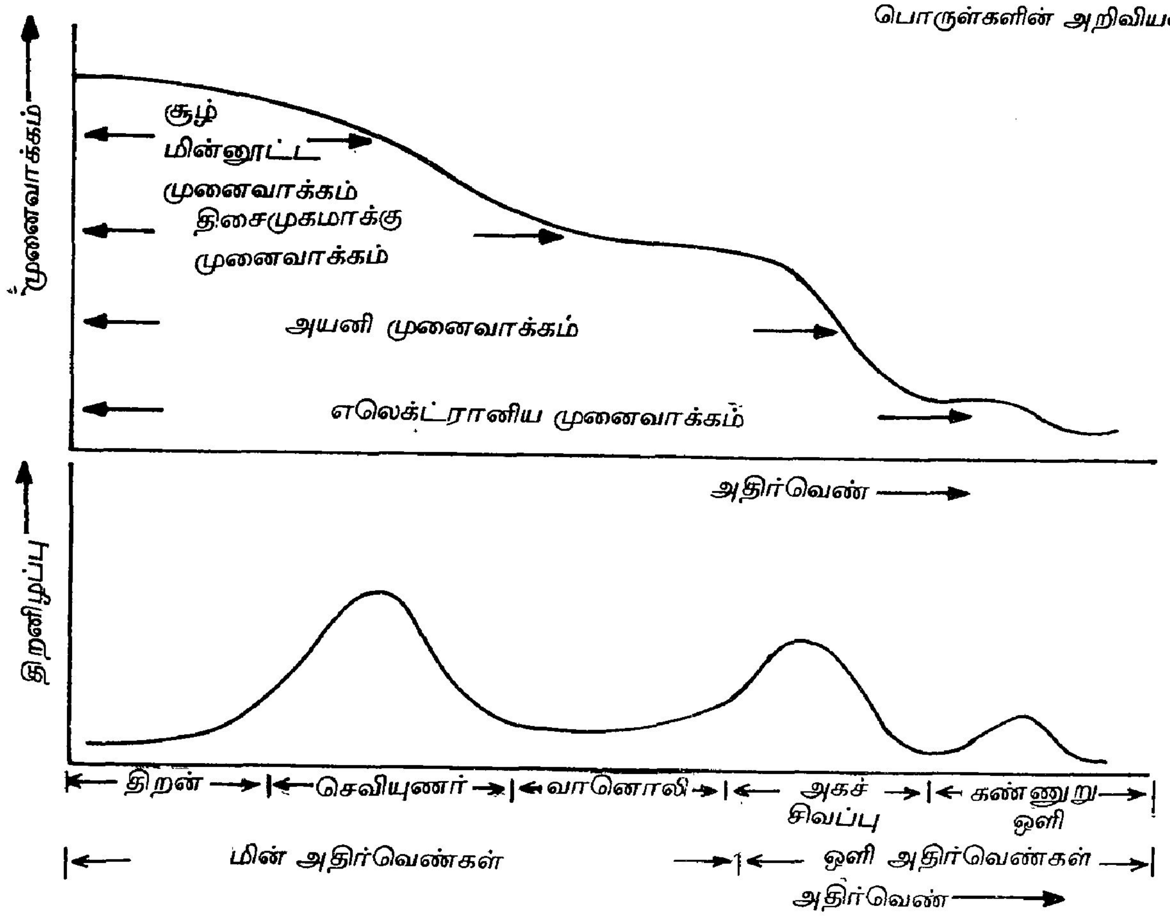


(அ) (ஆ)

படம் 11.6 (அ) ஆற்றலிழப்பு உள்ள மின்கடத்தாப்பொருளுள்ள மின்தேக்கியின் நிகர் சுற்று (equivalent circuit).

(ஆ) ஆற்றலிழப்புள்ள மின்கடத்தாப் பொருளில் மின்னோட்ட அடர்த்தி வெக்டாரின் இருகூறுகளைக் காண்பிக்கும் படம் மேலும் படத்தில் ஆற்றலிழப்புக்கோணம் 'δ' வும் காண்பிக்கப்பட்டுள்ளது.

அதனால், மின்கடத்தாப்பொருளின் ஒப்புமை மின்மறுப்புத்திறன் மெய்யானால் திறனிழப்பு ஏதும் ஏற்படாது. எலெக்ட்ரானிய முனைவாக்கத் திறனும், அயனி முனைவாக்கத்திறனும் முறையே புறஊதா, அகச்சிவப்பு அதிர்வெண்களில் பாதிக்கப்பட்டுச் சிக்கலான கணியங்களாகிவிடுகின்றன. ஆனால், தாழ்ந்த அதிர்வெண்களில் அவை மெய்யான கணியங்களாக விளங்குகின்றன. அதனால், செயற்படும் மின்புலத்தின் அதிர்வெண் அகச்சிவப்பு அதிர்வெண்களைவிடத் தாழ்ந்திருக்குமானால் **கணியம்** 'ε_r' மெய்யானதாயிருக்கும்; மின்கடத்தாப்பொருளிலும் ஆற்றலிழப்பு ஏற்படாது. இச்சிறப்பு நுண்ணலை அதிர்வெண்கள்வரை இருக்கும். எனினும், மேலே கூறப்பட்ட ஆற்றலிழப்பு ஏற்படாத அதிர்வெண்களிலும்கூடக் கண்ணாடி வகையைச் சார்ந்த பொருள்களிலும், சிலபடிகங்களிலும் மின்புலத்தைச் செலுத்தும்போது அயனிகள், ஒன்று அல்லது அதற்கு மேற்பட்ட அணுஇடைத்தூர அளவிற்குக் கூட நகரும். இதனால், ஒப்புமை மின்மறுப்புத்திறனுக்குமெய்ப்பகுதியோடு, கற்பனைப் பகுதியும் வந்துசேரும். இதனால், மின்னிழப்புகள் உண்டாகும். படம் 11.6 (அ)வில் ஆற்றலிழப்புடையமின்கடத்தாப் பொருளைத் தன்னகத்தே கொண்டுள்ள ஒரு மின்தேக்கியும், ஒருமின்தடையைப்பக்க இணைப்பில் கொண்டுள்ள இலக்கணம் வாய்ந்த மின்தேக்கியும் சமம் என்று காட்டப் பட்டுள்ளது. பக்கஇணைப்பில் உள்ள மின்தடை, ஆற்றலிழப்பு ஏற்படுவதைக் காட்டு கிறது. பக்கஇணைப்பிலுள்ள மின்தடையின் மதிப்பு ε_r'' யக்கு எதிர்விகிதத்தில் இருக்கும்.



படம் 11.7 பல்வேறு முனைவாக்கங்களும், அதிர்வெண்களை எங்ஙனம் சார்ந்துள்ளன என்பதையும், அதிகமான திறனிழப்பு எந்தெந்த அதிர்வெண் பகுதிகளில் ஏற்படுகிறது என்பதையும் காட்டும் வரைகள்.

படம் 11.7இல் பலவகை முனைவாக்கங்களும், அவை எந்தெந்த மாறுதிசை மின்புல அதிர்வெண்களில் ஏற்படுகின்றன என்பதும் காண்பிக்கப்பட்டுள்ளது. எலெக்ட்ரானிய முனைவாக்கம் அனைத்து அதிர்வெண்களிலும், அயனி முனைவாக்கம் ஒளி அதிர்வெண்கள் தவிர, மற்ற அதிர்வெண்களிலும், திசைமுகமாக்கு முனைவாக்கம் மின்அதிர்வெண்களிலும் (electrical frequencies), சூழ்மின்னூட்ட முனைவாக்கம் திறன்அதிர்வெண்களிலும் (power frequencies, 50-60 Hz) உண்டாகின்றன. மேலும், குறைவான அதிர்வெண்களில் அனைத்து முனைவாக்கங்களும் தோன்றுவதால் முனைவாக்கத்தின் மொத்த மதிப்பு மிக அதிக அளவில் இருக்கும். அதேசமயம் ஒளி அதிர்வெண்களில் மொத்த முனைவாக்க மதிப்பு மிகக்குறைவாயுள்ளது.

எலெக்ட்ரானிய முனைவாக்கமும் அயனி முனைவாக்கமும் வெப்பநிலையைச் சார்ந்தன அல்ல என்று முன்பே கண்டோம். மேலும், திசைமுகமாக்கு முனைவாக்கம் மிகஅதிக அளவில் வெப்பநிலையைச் சார்ந்துள்ளது. அஃதாவது, வெப்பநிலைகளில் உயர, திசை முகமாக்கு முனைவாக்கம் குறைகிறது. குறிப்பிட்ட முனைவாக்கம் சாதாரண

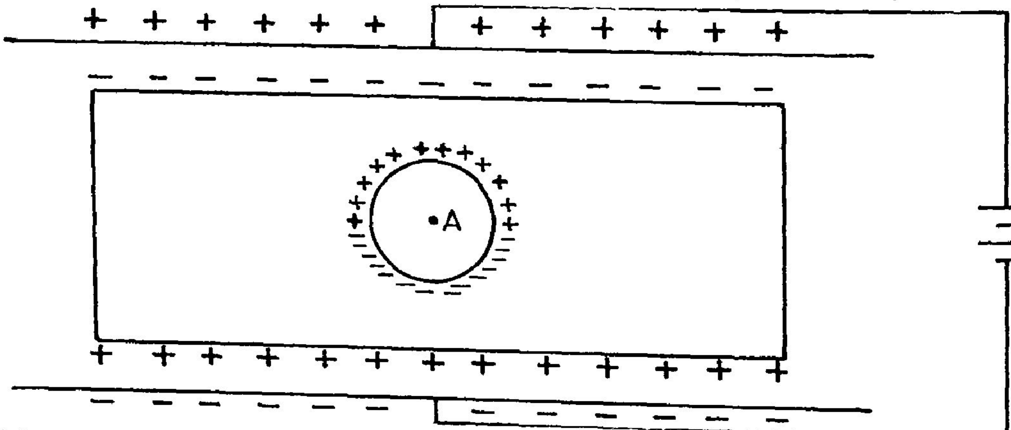
வெப்பநிலைகளில் உயர் அதிர்வெண்களில் ஏற்படவில்லையெனினும், அப்பொருளை உயர்வெப்பநிலைக்கு உயர்த்தும்போது அவ்வுயர் அதிர்வெண்களில் அம் முனைவாக்கம் ஏற்பட முடியும். அதிவெப்பநிலைகள் மூலக்கூறுகளையும், அயனிகளையும் நன்கு இடப்பெயர்ச்சி செய்ய உதவுவதால் மேற்கூறிய விளைவு ஏற்படுகிறது. ஆனால், சாதாரண வெப்பநிலை, நிலையான மின் இருமுனைவுகள் தங்கள் திருப்புத்திறன்களை மின்புலத்திசைக்குத் திருப்ப முயலும்போது எதிர்க்கும்.

11.4 உட்புலம் (local field (or) internal field)

ஒரு மின்கடத்தாப்பொருளில் உள்ள ஓர்அணு அல்லது ஒருமூலக்கூறு காணும் மொத்தச் சராசரி மின்புலத்தை உட்புலம் என்கிறோம். மூலக்கூறு உட்புலம் 'E_i', புறமின்புலம் 'E'யை விட அதிகமாயிருக்கும். இதன் காரணத்தைப் பின்வரும் பகுதி நன்கு விளக்கும்.

ஒரு கனசதுர இயலமைப்புடைய மின்கடத்தாப் பொருளுக்கு இலாரென்சு முறையில் உட்புலம் கணக்கிடல் :

ஒரு மின்கடத்தாப் பொருள் ஓர் இணைதகடு மின்தேக்கியின் (parallel plate capacitor) தகடுகளுக்கு இடையில் உள்ளதாகக் கொள்வோம். மேலும், மின்கடத்தாப்பொருளின்கண் உள்ள ஓர்அணு 'A'யைச் சுற்றி ஒரு கற்பனைக் கோளப்பொந்து (spherical cavity) உள்ளதாகவும், அந்தப் பொந்தின் ஆரம், அணுஆரத்தைவிட மிக அதிகம் எனவும் கொள்வோம்.



படம் 11.8 கோளப்பொந்து உள்ள ஒரு மின்கடத்தாப்பொருளும் அதனைச் சுற்றி மின்னூட்டங்களின் பகிர்வும்

அணு 'A' உள்ள இடத்தில் உட்புலம் E_1, E_2, E_3, E_4, போன்ற நான்கு கூறுகளையுடையதாய்க் கொள்வோம்.

E_1 என்பது Aயில் தகடுகளிலுள்ள மின்னேற்ற அடர்த்தியால் வரும் மின்புலச் செறிவு ஆகும். புலக்கொள்கையின்மூலம் பின்வரும் சமன்பாடுகளை நாம் முன்பே அறிந்துள்ளோம்.

$$E_1 = D/\varepsilon_o$$

$$D = P + E\varepsilon_o$$

$$\boldsymbol{E_1 = E + P/\varepsilon_o} \qquad (11.20)$$

இதில் D, E, P முறையே மின்பாய அடர்த்தி, வெளிமின்புலச் செறிவு, முனைவாக்கம் ஆகும்.

'E_2' என்பது 'A'யில் மின்கடத்தாப் பொருளின் இருபக்கங்களிலும் தூண்டப்பட்ட மின்னேற்ற அடர்த்தியால்வரும் மின்புலச் செறிவு ஆகும்.

அதனால்,
$$\boldsymbol{E_2 = -\frac{P}{\varepsilon_o}} \qquad (11.21)$$

'E_3' என்பது 'A'யில் கற்பனைப் பொந்திலுள்ள அணுக்களால் வரும் மின்இருமுனைவு மின்புலச்செறிவு ஆகும். வெளிமின்புலம் 'x' திசையில் செலுத்தப்படுவதாயும், மின்கடத்தாப் பொருள் கோள வடிவிலும், அணிக்கோவை கன சதுரச் சமச்சீர் உடையதும், 'A' என்ற அணு பொருளின் நடுவிலும் உள்ளதாகக் கொள்வோம். ஒரு மின் இருமுனைவால் ஒரு புள்ளியில் ஏற்படும் புலச் செறிவு,

$$\vec{E}(r) = \frac{(3\,(\vec{\mu}\cdot\vec{r})\,\vec{r} - r^2\,\vec{\mu})}{4\pi\varepsilon_o\,r^5}$$

ஆகும். $\vec{\mu}$ என்பது மின்இருமுனைவுதிருப்புத்திறன் வெக்டார் ஆகும். இங்கு மின்புலம் 'x' திசையில் செலுத்தப்படுவதால், மின் இருமுனைவுகளால் 'A'யில் ஏற்படும் தொகுபயன் மின்புலச் செறிவு,

$$E_3 = E_x = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\,(\sum_i \mu_i\,(3x_i^2 - r_i^2)/r_i^5)$$

இதில் 'μ_i' என்பது 'x' திசையில் உள்ள திருப்புத்திறன் வெக்டாராகும். பொருள் கோள வடிவில் இருப்பதாலும், கனசதுரச் சமச்சீரில் இருப்பதாலும் மின்இருமுனைவு மின்புலத்தின் 'E_y', 'E_z' ஆகிய கூறுகள் சுழியாகிவிடும். மேலும், கோளச் சமச்சீர் உள்ளபோது,

$$x_i^2 = y_i^2 = z_i^2$$

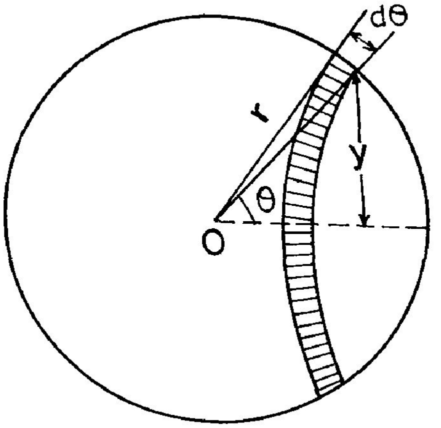
$$r_i^2 = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2$$

(அல்லது) $\therefore\ r_i^2 = 3\,x_i^2$

$$\therefore \boldsymbol{E_3 = 0} \qquad (11.22)$$

எடுத்துக்கொள்ளப்பட்ட பொருள் கோளவடிவில் இல்லாதபோதும், 'A' என்னும் அணு, பொருளின் நடுவில் இல்லாதபோதும், $E_3 = 0$ என்று கணக்கிடலாம். எனினும், பொருள் கனசதுர இயலமைப்பு உடையதாய் இருக்கவேண்டும்.

'E_4' என்பது கற்பனைப் பொந்தினைச் சுற்றியுள்ள முனைவாக்கத்தால் வரும் மின்னூட்டங்களின் அடர்த்தியால் 'A'யில் காணும் மின்புலச் செறிவாகும். கோளப் பொந்தில் ஒருமெல்லிய சிறுவளையத்தை எடுத்துக்கொள்வோம். அதன் பரப்பு θ க்கும் $\theta + d\theta$க்கும் இடையில் உள்ளதாய்க் கொள்வோம். இதில் θ என்பது மின்புலத்திசையில் வளையப் பரப்பு நிலைகொண்டுள்ள கோணத்தின் அளவாகும்.



படம் 11.9 மின்புலத்திசையிலிருந்து θ டிகிரியில் உள்ள dA பரப்புள்ள சிறுவளையம்.

படத்தில் காட்டியுள்ளவாறு

$$\text{வளையப் பரப்பு} = dA = (2\pi y).\ \text{(வளையத்தின் தடிமன்)}$$

$$= (2\pi y) \cdot (r d\theta)$$

$$\text{இங்கு } \sin\theta = y/r \text{ ஆகும்.}$$

$$\therefore dA = 2\pi r^2 \sin\theta\, d\theta$$

இதில் 'r' என்பது கோளப் பொந்தின் ஆரமாகும். 'y' என்பது வளையத்தின் ஆரமாகும். இந்தச் சிறுவளையத்தில் உள்ள மின்னூட்டம் 'dq', முனைவாக்கத்தின் குத்துக்கூறும் (normal component) சிறுவளையப்பரப்பும் சேர்ந்த பெருக்கற் பயனாகும். அஃதாவது,

$$dq = P\cos\theta\, dA = 2\pi r^2 P\cos\theta \sin\theta\, d\theta$$

மின்புலச் செறிவு E_4 – ல், $E_4 \cos\theta$ என்பது பயனுறுகூறாகும்.

$$\therefore E_4 = \int dE_4 \cos\theta$$

$$= \int \frac{dq \cos\theta}{4\pi\varepsilon_o r^2}$$

$$(\text{அல்லது})\ E_4 = \int_0^{\pi} \frac{2\pi\, r^2\, P\cos^2\theta \sin\theta\, d\theta}{4\,\pi\,\varepsilon_0\, r^2} = \frac{-P}{2\,\varepsilon_0}\int_0^{\pi} \cos^2\theta\, d\cos\theta$$

$$\therefore\ E_4 = \frac{P}{3\,\varepsilon_0} \tag{11.23}$$

எனவே E_1, E_2, E_3 மற்றும் E_4 ஆகிய கூறுகளின் மதிப்புகளை E_iயில் இட்டபின்,

$$E_i = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 = E + \frac{P}{\varepsilon_o} - \frac{P}{\varepsilon_o} + 0 + \frac{P}{3\,\varepsilon_o}$$

$$\boxed{E_i = E + \frac{P}{3\,\varepsilon_o}} \tag{11.24}$$

பொதுவாக, உட்புலத்தின் மதிப்பு, வெளிமின்புல மதிப்பினைவிட அதிகமாயிருக்கும். ஏனெனில், உட்புலகணக்கீட்டில் மூலக்கூறுகளின் சொந்த மின்புலம் எடுத்துக்கொள்ளப் படுவதில்லை. அப்புலம் வெளிமின்புலத்தின் எதிர்த்திசையில் நிலைகொண்டிருக்கும்.

11.5 கிளாஷியஸ்–மொசாட்டித் தொடர்பு (Clausius – Mosotti relation)

வைரம், சிலிக்கான், ஜெர்மேனியம் போன்ற ஒரேமாதிரி அணுக்களால் அமைந்த திண்மங்கள் தனிம மின்கடத்தாப் பொருள்கள் (elemental dielectrics) எனப்படும். இவை கனசதுர இயலமைப்புடையவை. இத்தகைய பொருள்களில் எல்லா அணுக்களும் ஒத்தவையாதலால் இவற்றில் அயனிகளோ, நிலையான இருமுனைவுகளோ இருத்தற்கு நியாயமில்லை. அதனால் அவற்றின்,

$$\alpha_i = 0 = \alpha_o$$

இதில் $\alpha_i =$ அயனி முனைவாக்கத்திறன்; $\alpha_o =$ திசைமுகமாக்கு முனைவாக்கத்திறன். அதனால் இவற்றில் ஏற்படக்கூடிய முனைவாக்கத்திறன் எலெக்ட்ரானிய முனைவாக்கத்திறன் 'α_e' மட்டுமே ஆகும். சென்ற பகுதியில் E_i – யின் மதிப்பினைக் கண்டோம். அதனை இங்கு முனைவாக்கம் காணப்பயன்படுத்துவோம்.

$$P = N\alpha_e E_i = N\alpha_e\left(E + \frac{P}{3\varepsilon_o}\right)$$

$$P\left(1 - \frac{N\alpha_e}{3\,\varepsilon_o}\right) = N\alpha_e E$$

$$P = \frac{N\,\alpha_e\,E}{1 - \dfrac{N\alpha_e}{3\varepsilon_o}} \tag{11.25}$$

மின்பாய அடர்த்தி $D = P + \varepsilon_o E$ அல்லது $P = D - \varepsilon_o E$ ஆகும்.

$$\text{அதனால்,}\quad \frac{P}{E} = \frac{D}{E} - \varepsilon_o = \varepsilon - \varepsilon_o = \varepsilon_r\,\varepsilon_o - \varepsilon_o\ .$$

$$\therefore\ P = E\,\varepsilon_o\,(\varepsilon_r - 1) \qquad (11.26)$$

இதில் 'ε' என்பது பொருளின் மின்மறுப்புத்திறன்; $\varepsilon_r \left(= \frac{\varepsilon}{\varepsilon_o} \right)$ என்பது பொருளின் ஒப்புமை மின்மறுப்புத்திறன் அல்லது மின்கடத்தாப் பொருள் மாறிலி ஆகும். சமன்பாடுகள் (11.25) மற்றும் (11.26) ஆகிய இரண்டின் இடப்பக்கங்கள் சமம். அதனால்,

$$P = \varepsilon_o\,(\varepsilon_r - 1)\,E = \frac{N\alpha_e\,E}{\left(1 - \frac{N\alpha_e}{3\,\varepsilon_o}\right)}$$

$$1 - \frac{N\alpha_e}{3\varepsilon_o} = \frac{N\alpha_e}{\varepsilon_o\,(\varepsilon_r - 1)}$$

$$1 = \frac{N\alpha_e}{3\varepsilon_o} + \frac{N\alpha_e}{\varepsilon_o\,(\varepsilon_r - 1)}$$

$$= \frac{N\alpha_e}{3\varepsilon_o}\left(1 + \frac{3}{(\varepsilon_r - 1)}\right)$$

$$\frac{N\alpha_e}{3\varepsilon_o} = \frac{1}{1 + \frac{3}{\varepsilon_r - 1}}$$

(அல்லது)
$$\boxed{\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} = \frac{N\alpha_e}{3\varepsilon_o}} \qquad (11.27)$$

இதில் 'N' என்பது ஓரலகு பருமனில் உள்ள மொத்த அணுக்களின் அல்லது மொத்த மூலக்கூறுகளின் எண்ணிக்கை ஆகும். இதுவே கிளாஷியஸ்- மொசாட்டித் தொடர்பு ஆகும். சோதனைமூலம் ε_rயின் மதிப்பினைக் கண்டுபிடித்து விட்டால் பொருளின் α_eன் மதிப்பினை இச் சமன்பாடுமூலம் கணக்கிடலாம்.

மேலும், மின்கடத்தாப் பொருளில் வெவ்வேறு வகையான மூலக்கூறுகளோ, அணுக்களோ உள்ளதாய்க் கொள்வோம். பின் கிளாஷியஸ்- மொசாட்டித் தொடர்பு,

$$\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} = \frac{1}{3\varepsilon_o}\sum_j N_j\,\alpha_j \qquad (11.28)$$

என மாறும். இதில் 'N_j', 'α'$_j$ என்பது முறையே ஒவ்வொருவகை மூலக்கூறு அல்லது அணுக்களின் மொத்த எண்ணிக்கை, மொத்த முனைவாக்கத் திறன் ஆகும். மேலும்,

இச்சமன்பாடு தனிம மின்கடத்தாப் பொருள்களுக்கு மட்டுமில்லாமல் வாயுப் பொருள்களுக்கும், அடுத்தப்படியாய் திரவப் பொருள்களுக்கும் பயன்படுத்தலாம். ஆனால், திண்மநிலையிலுள்ள படிகப் பொருள்களுக்கு இத்தொடர்பினைப் பயன்படுத்த முடியாது. ஏனெனில், நமது மாதிரி மிக எளிமையானது. மேலும், திண்மப் பொருள்களில் பலவித இடைவினைகளால் பலவகை முனைவாக்கங்கள் ஏற்படலாம். அதனால்வரும் கூறுகளையும் கிளாஷியஸ்-மொசாட்டித் தொடர்பில் சேர்க்க வேண்டும். இவ்வாறு சேர்க்கும்போது இத்தொடர்பு சிக்கல் மிகுந்த தொடர்பாகிவிடும்.

11.6 ஃபெரோ மின்னியல் (ferroelectricity)

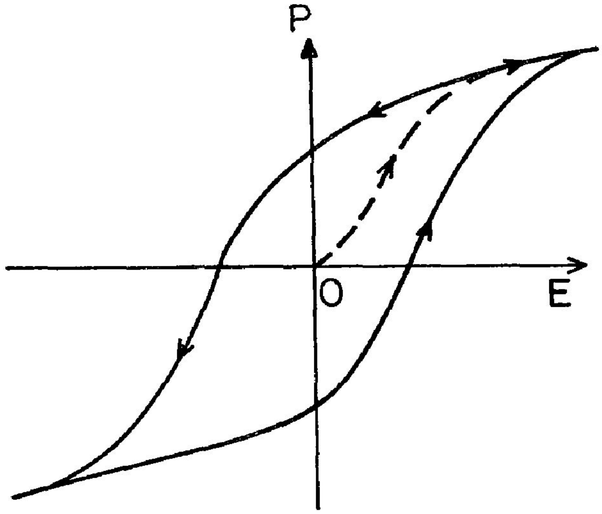
சிலபொருள்களில் மின்புலத்தின் ஆளுகைக்கு முன்னரே முனைவாக்கம் இருக்கும். இப்பொருள்களை ஃபெரோ மின்னியற் பொருள்கள் என்று கூறுகிறோம். இவற்றில் மின்கடத்தாப் பொருள் மாறிலியின் மதிப்புச் சாதாரண மின்கடத்தாப் பொருள்களில் உள்ளதைவிடப் பலமடங்கு உயர்ந்ததாயிருக்கும். ஃபெரோ மின்னியற் பொருள்கள் மின் தேக்கவிளைவு (hysteresis) உடையதாய் இருக்கின்றன. இந்நிகழ்ச்சி இரும்பியல் காந்தப் பொருள்களில் காணும் தயக்க விளைவைப் போன்று இருப்பதால் மேற்கண்ட பொருள்கள் ஃபெரோ மின்னியற் பொருள்கள் என வழங்கலாயிற்று. பேரியம் டைட்டனேட் $(Ba\,Ti\,O_3)$, பொட்டாசியம் டை ஹைடிரஜன் பாஸ்பேட்டு $(KH_2\,PO_4)$, ரோஷல் உப்பு $(N_a\,K\,(C_4\,H_4\,O_6)\cdot 4\,H_2O)$, லித்தியம் நியோபேட் $(L_i\,NbO_3)$ போன்றவை ஃபெரோ மின்னியல் தன்மை வாய்ந்த பொருள்களாகும். படம் 11.10-இல் ஃபெரோ மின்னியற் பொருள்களில் காணும் தேக்கவிளைவுகண்ணி (hysteresis loop) காண்பிக்கப்பட்டுள்ளது. இரும்பியல் காந்தப் பொருள்களில் தேக்கவிளைவு கண்ணியின்மூலம் தன்னியல் காந்தமாக்கலை (spontaneous magnetisation)த் தெரிந்துகொள்ளலாம். அதேபோல் இங்கும் மின்தேக்கவிளைவால் நாம் **தன்னியல் முனைவாக்கம்** (spontaneous polarisation) இவ்விதப் பொருள்களில் ஏற்படுகிறது என்பதைத் தெரிந்துகொள்ளலாம். தன்னியல் முனைவாக்கம் என்பது வெளிமின்புலம் சுழியாயிருக்கும்பொழுது பொருளில் முனைவாக்கம் நிலைத்திருப்பதாகும். இவ்விதப் பொருள்களில் நிலையான மின்இருமுனைவுகளும், மிகுந்த உட்புலமும் இருப்பதால் தன்னியல் முனைவாக்கம் ஏற்படுகிறது.

தன்னியல் முனைவாக்கம் ஏற்பட நிபந்தனை :

சென்ற பகுதியில் $P = \dfrac{N\alpha_e E}{1 - (N\alpha_e/3\varepsilon_o)}$ என்று கண்டோம். இச் சமன்பாட்டின் தொகுதி (denominator)யான $1-(N\alpha_e/3\varepsilon_o)$ சுழியாய் மாறினால், $P \to \infty$ என ஆகும். இதற்குப் பொருள் $1-(N\alpha_e/3\varepsilon_o)$ சுழியாய் மாறும்போது பொருளில் தன்னியல் முனைவாக்கம் ஏற்படுகிறது என்றாகும். அதனால் பொருள் வெளிமின்புலம் இல்லாமல் முனைவாக்கம் உடையதாய் மாற, அல்லது பொருளில் தன்னியல் முனைவாக்கம் ஏற்பட,

$$\frac{N\alpha_e}{3\varepsilon_o} = 1 \qquad (11.29)$$

என்று இருக்க வேண்டும்.



படம் 11.10 மின் தேக்கவிளைவு கண்ணி

ஃபெரோ மின்னியல்பற்றி மின்இருமுனைவுக் கொள்கை (dipole theory of ferroelectricity)

ஃபெரோ மின்னியற் பொருள், நிலையான இருமுனைவுத் திருப்புத்திறன்களால் ஆனது. இதில் அடுத்தடுத்துள்ள இருமுனைவுத் திருப்புத்திறன்களிடையே பெருமளவில் இடைவினை (interaction) இருக்கும். இச்செயலால் ஓர் இருமுனைவுத் திருப்புத்திறன் அடுத்துள்ள இருமுனைவுத் திருப்புத் திறனைத் தன்திசைக்குத் திருப்ப முயலும். இரும்பியல் காந்தப் பொருள்களில் உள்ள அணுக்கள் அல்லது மூலக்கூறுகளின் காந்தத் திருப்புத்திறன் வெளிக் காந்தப் புலமில்லாமலேயே ஒருதிசையில் நிலைகொண்டிருப்பது போல் இங்கும் மின் இருமுனைவுத் திருப்புத்திறன்கள் ஒருதிசையில் நிலை பெற்றுத் தன்னியல் முனைவாக்கத்திற்கு வழிவகுக்கின்றன. இதனால் பொருளில் முனைவாக்கம் ஏற்படுகிறது என வைத்துக்கொள்வோம். இவ்வத்தியாத்தின் முதற்பகுதியில் சாதாரண வெப்பநிலையிலும், உயர் வெப்பநிலையிலும் நிலையான இருமுனைவு உள்ள பொருள்களில் ஏற்படும் திசைமுகமாக்கு முனைவாக்கத்தின் மதிப்பு,

$$P = \frac{N\mu^2 E}{3kT}$$

எனக் கண்டோம். இதில் 'E'க்குப் பதிலாய் மூலக்கூறு காணும் உட்புலம் E_iயை இட, முனைவாக்கம்,

$$P = \frac{N\mu^2 E_i}{3kT} = \frac{N\mu^2}{3kT}\left(E + \frac{\gamma P}{\varepsilon_0}\right)$$

என மாறும். அதனால், ஒவ்வொரு மின்இருமுனைவும் வெளிமின்புலத்தைவிட அதிக ஆற்றல் வாய்ந்த உட்புலம் E_iயின் ஆளுகையில் இருப்பதால்தான் தன்னியல்

முனைவாக்கம் ஏற்படுகிறது. மேலும், உட்புலம் E_iக்குரிய தொடர்பில் $\frac{1}{3}$க்குப் பதிலாய் 'γ'வைப் பயன்படுத்தியுள்ளோம்; பல நுண்கணக்கீடுகள் மூலம் உள்மின்புலக் குணகம் 'γ' ஒருமாறிலியாயில்லாமல் மின்கடத்தாப்பொருள்மாறிலிக்கு எதிர்விகிதத்தில் உள்ளது என்று கண்டுபிடிக்கப் பட்டுள்ளது. பெரும்பாலும் உள்மின்புலக் குணகம் பொருளின் இயலமைப்பினைச் சார்ந்துள்ளது. மேற்கண்ட சமன்பாட்டை மாற்றியமைத்த பின், முனைவாக்கம்,

$$P = \frac{N\mu^2 E}{3\,kT\left(1 - \frac{N\mu^2\gamma}{3\,kT\,\varepsilon_o}\right)}$$

முனைவாக்க ஏற்புத் திறன் $\chi_e = \frac{P}{\varepsilon_o E} = \frac{N\mu^2}{3\,k\,\varepsilon_o\,T\left(1 - \frac{N\mu^2\gamma}{3\,kT\,\varepsilon_o}\right)}$

மேற்கண்ட சமன்பாட்டில் $C = \frac{N\mu^2}{3\,k\,\varepsilon_o}$ மற்றும் $\theta = C\gamma$ என இட

$$\chi_e = \frac{C}{T - \theta}$$

இங்கு 'C' என்பதை ஃபெரோ மின்னியல் கியூரிமாறிலி என்றும், θ என்பதை ஃபெரோ மின்னியல் கியூரி வெப்பநிலை என்றும் கூறுவர்.

ஆனால், புலக் கொள்கையின்படி, $\frac{P}{E} = \varepsilon_o\,(\varepsilon_r - 1)$

$$\therefore \chi_e = \frac{P}{\varepsilon_o E} = (\varepsilon_r - 1)$$

$$(\text{அல்லது})\quad \chi_e = (\varepsilon_r - 1) = \frac{C}{T - \theta}\quad (\text{கியூரி-வெயிஸ் விதி}) \qquad (11.30)$$

இக்கியூரி-வெயிஸ் விதியின்படி, பொருளில் வெப்பநிலை ஃபெரோ மின்னியல் கியூரி வெப்பநிலையைவிட அதிகம் ஆகும்போது ஃபெரோ மின்னியற் பொருள், பாரா மின்னியற் பொருளாகிவிடும். அதனால், $T < \theta$ என்றிருக்கும்பொழுது தன்னியல் முனைவாக்கம் ஏற்பட்டு ஃபெரோ மின்னியல் தன்மைகள் உண்டாகும். இதனைப் பின்வருமாறு கண்டுபிடிக்கலாம். இலாஞ்சுவின் கொள்கைப்படி பாராக்காந்தப் பொருள்களுக்குக் காந்த மாக்கச் செறிவு (intensity of magnetisation),

$$I = N\mu\,L(\alpha)$$

$$\text{இதில்}\quad \alpha = \frac{\mu B}{kT}\,;\; L(\alpha) = \coth\alpha - \frac{1}{\alpha}$$

இதனையே மின்னியலிலும் எடுத்துக்கொள்ளப் பாரா மின்னியற் பொருள்களுக்கு முனைவாக்கம்.

$$P = N \mu L(\beta) \tag{11.31}$$

இதில் $$\beta = \frac{\mu E_i}{kT}.$$

βவின் மதிப்பு மிகஅதிகமாயிருக்கும்போது $L(\beta)$வின் மதிப்பு 1ஐ நெருங்கும்; முனைவாக்கமும் அதன் தெவிட்டிய மதிப்பினை அடைந்திருக்கும்.

$$\therefore P_{\text{தெவி}} = N \mu \tag{11.32}$$

சமன்பாடு (11.31)-ஐ சமன்பாடு (11.32)-ஆல் வகுக்க,

$$\frac{P}{P_{\text{தெவி}}} = L(\beta) = L(\mu E_i/kT) = L\left(\frac{\mu}{kT}\left(E + \frac{\gamma P}{\varepsilon_o}\right)\right) \tag{11.33}$$

அதனால், தன்னியல் முனைவாக்கம் ஏற்பட, புறமின்புலம் $E = 0$ ஆகும்போது 'P'க்குச் சுழியில்லாத ஒருமதிப்பு இச்சமன்பாட்டில் இருக்கவேண்டும். அதனால், சமன்பாடு (11.33)-இல் உள்ள 'E'இன் மதிப்பினைச்சுழி என எடுத்துக்கொள்ள,

$$\frac{P}{P_{\text{தெவி}}} = L\left(\frac{\mu \gamma P}{kT \varepsilon_o}\right) = L(x) = \coth x - \frac{1}{x} \tag{11.34}$$

இதில் $$x = \frac{\mu \gamma P}{kT \varepsilon_o} \tag{11.35}$$

அதனால், சமன்பாடு (11.35) மூலம்

$$P = \frac{kT \varepsilon_o x}{\mu \gamma} \tag{11.36}$$

ஆனால், $P_{\text{தெவி}} = N\mu \quad \therefore \dfrac{P}{P_{\text{தெவி}}} = \dfrac{kT \varepsilon_o x}{N \mu^2 \gamma}$ (11.37)

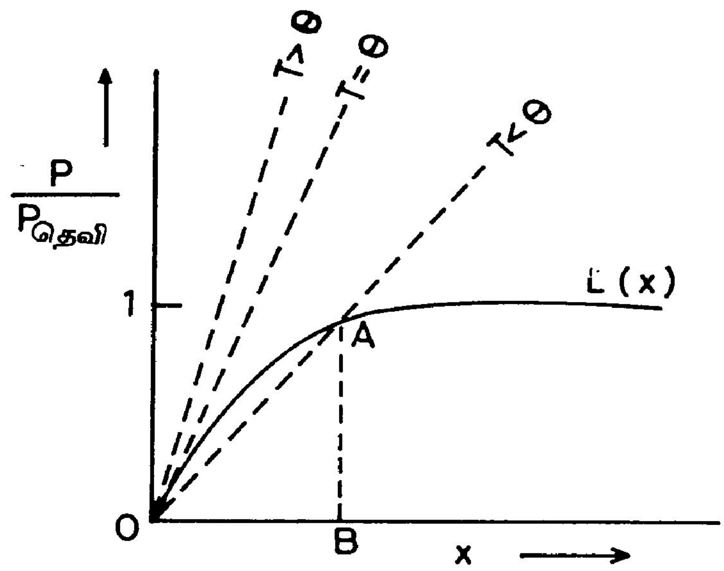
ஃபெரோ மின்னியல் கியூரி வெப்பநிலை,

$$\theta = \frac{N \mu^2 \gamma}{3 k \varepsilon_o}$$

என முன்பே தெரியும். இதை (11.37)இல் இட,

$$\frac{P}{P_{\text{தெவி}}} = \frac{T x}{3 \theta} \tag{11.38}$$

இவ்வாறாய் $\dfrac{P}{P_{\text{தெவி}}}$க்கும் '$x$'க்கும் இடையே இரண்டு ஒருங்கமைச் சமன்பாடுகளை (சமன்பாடு (11.34)-ம், சமன்பாடு (11.38)-ம்)ப் பெற்றுள்ளோம். படம் (11.11)-இல்



படம் 11.11 : இலாஞ்சுவின் கோடும், $\frac{P}{P_{\text{தெவி}}} - x$ கோடுகளும்.

$\frac{P}{P_{\text{தெவி}}}$ க்கும் , x–க்கும் இடையே வரையப்பட்டவரை கொடுக்கப்பட்டுள்ளது. அதில் இலாஞ்சுவின் கோடும் $(L(x)), T<\theta, T=\theta, T>\theta$ ஆகிய நேர்வுகளில் ஆதி (origin) வழியாய்ச் செல்லும் மூன்றுகோடுகளும் காட்டப்பெற்றுள்ளன. இவற்றுள் $T<\theta$ கோடு, இலாஞ்சுவின் கோட்டை 'O'விலும் 'A'யிலும் வெட்டுகிறது. அதனால், சமன்பாடுகள் (11.34), (11.38) ஆகிய இரண்டிற்கும் பொருந்திவரும் மதிப்புகள்

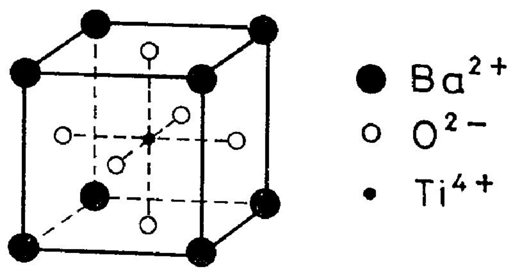
$$\frac{P}{P_{\text{தெவி}}} = 0 \text{ அல்லது AB ஆகும்.}$$

ஆனால், $\frac{P}{P_{\text{தெவி}}} = 0$ என்பது உண்மையான தீர்வாய் இருக்க முடியாது. ஏனெனில், தன்னியல் முனைவாக்கத்திற்கு $P \neq 0$. அதனால் ஒரே தீர்வு $\frac{P}{P_{\text{தெவி}}} = AB$ ஆகும். அடுத்து $T>\theta$ நேர்க்கோடு இலாஞ்சுவின் கோட்டை ஆதி தவிர்த்து, வேறெங்கும் வெட்டவில்லை. அதனால், தன்னியல் முனைவாக்கம் நடைபெற வாய்ப்பில்லை; $T<\theta$ என இருக்கும் போதுமட்டும் தன்னியல் முனைவாக்கம் நடைபெறுகிறது.

11.7 பேரியம் டைடனேட்டின் பெருங்கூறும், அதில் ஏற்படும் தன்னியல் முனைவாக்கமும்

அணிக்கோவையில் ஏற்படும் வேறுபாடுகளால் பேரியம் டைடனேட் $(Ba\,Ti\,O_3)$ படிக இயலமைப்பில் மாறுதல் ஏற்பட்டு அதற்கு ஃபெரோ மின்னியற் பண்பு கிடைக்கிறது.

120°C –க்கு மேலுள்ள வெப்பநிலையில் டைடானியம் அயனி உருவமையத்திலும், பேரியம் அயனிகள் உருவ மூலைகளிலும், ஆக்ஸிஜன் அயனிகள் முகமையங்களிலும் உள்ள கனசதுர இயலமைப்புள்ள படிகமாய்ப் பேரியம் டைடனேட் இருக்கும். இந்த வெப்ப நிலையில் அதில் தன்னியல் முனைவாக்கம் ஏதும் இராது. ஆனால், படிகத்தை 120°C –க்குக் கீழே குளிரப்படுத்தினால் உடனே டைடானியம் அயனிகள் கனசதுர உருவமையத்திலிருந்து இடப்பெயர்ச்சி செய்கின்றன.



படம் 11.12 பேரியம் டைடனேட் படிக அலகு செல்

இதன் காரணமாய்ப் பக்கத்து அயனிகள் பாதிக்கப்பட்டு அவைகளும் படிகத்தின் ஒருகுறிப்பிட்ட திசையில் இடப்பெயர்ச்சி அடைகின்றன. அதனால், அத்திசை நீட்சி அடைகிறது. இதனையே நாற்கோண (tetragonal) செல்லிலுள்ள '*C*' திசை என்பர். அதனால் டைடானிய அயனியின் இடப்பெயர்வின் காரணமாய் மின்இருமுனைவு தோன்றுகிறது. பக்கத்து அலகு செல்களில் உள்ள மின்இருமுனைவுகளும் '*C*' திசையில் இணைப்பெறுமை (parallel orientation) பெறுகின்றன. இந்நிகழ்ச்சி 5°C – லும் தோன்றித் தன்னியல் முனைவாக்கம் முகமூலைவிட்டத் திசையிலும், – 80°C – இல் அஃது உருவ மூலைவிட்டத்திலும் ஏற்படுகிறது. இவ்வாறாய்ப் பேரியம் டைடனேட் பல பெயர்வு வெப்பநிலைகளைக் கொண்டுள்ளதால் அதில் பல வெப்பநிலைகளில் தன்னியல் முனைவாக்கம் நடைபெறுகிறது. மேலும், இத்தகைய வெப்பநிலைகளில் பேரியம் டைடனேட்டின் மின்கடத்தாப்பொருள் மாறிலியின் மதிப்பு மிக அதிகமாயிருக்கும்.

எடுத்துக்கொள்ளப்பட்ட ஃபெரோ மின்னியல் படிகத்தின் பல பகுதிகளில் உள்ள நாற்கோண அச்சுகள் கனசதுரப்படிகத்தின் பல வேறு திசைகளில் நிலைகொண்டிருக்கின்றன. அஃதாவது, படிகத்தின் பல பகுதிகளில் தன்னியல் முனைவாக்கம் பல்வேறு திசைகளில் நடைபெறுகின்றன. இந்தப் பல்வேறு பகுதிகளைத்தான் பெருங்கூறுகள் (domains) என்று கூறுகிறோம். ஃபெரோமின்னியற் பெருங்கூறு என்பது வெளிமின்புலம் இல்லாமலேயே தன்னியல் முனைவாக்கம் பெற்ற

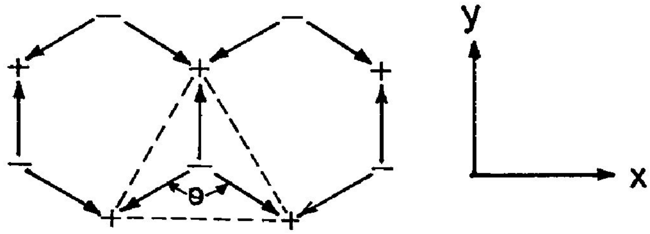
சிறு பகுதியாகும். பெருங்கூறில் உள்ள அனைத்து மின் இரு முனைவு திருப்புத் திறன்களும் ஒரே திசையில் நிலைகொண்டிருக்கும். குறிப்பாய்ப் பேரியம் டைடனேட்டின் ஒளிவிலகல் எண் C– திசையில் ஒருமதிப்பிலும், அதற்குச் செங்குத்தாயுள்ள திசையில் வேறு ஒருமதிப்பிலும் இருக்கும். பேரியம் டைடனேட் ஒளிபுகும் பொருளாயிருப்பதால் தளவிளைவுற்ற ஒளியை (polarised light) இதில் செலுத்திப் பொருளிலிருந்து ஒளிவிலகலடைந்துவரும் தளவிளைவுற்ற ஒளியைப் பகுப்பான் (analyser) மூலம் பார்க்கலாம். பேரியம் டைடனேட்டில் பெருங்கூறு அமைப்புகள் இருந்தால் ஒளிச்செறிவில் பெருமமாகவும், சிறுமமாகவும் உள்ள ஒளிப்பட்டைகள் பகுப்பானின் வழியேவரும் ஒளியில் தெரியும். இதன்மூலம் பேரியம் டைடனேட்டில் சாய்வு துண்டு (wedge) போன்ற சீரான பெருங்கூறுகள் பெயர்வு வெப்பநிலைகளில் (transition temperatures) தோன்றுகின்றன என்பது தெரியவந்தது. ஃபெரோ மின்னியல் பெருங்கூறின் சுவர்தடிமன் ஒருசில ஆங்ஸ்ட்ராம் அலகுகளே இருக்கும். ஆனால், காந்தப் பெருங்கூறின் சுவர்தடிமன் 1000 ஆங்ஸ்ட்ராம் அலகுகள்வரை இருக்கும்.

11.8 *பீசோ மின்னியல் அல்லது அழுத்த மின்னியல்* (Piezo electricity)

எந்திரத் திரிபால் மின்முனைவாக்கம் பெறும் பொருள்களுக்கு அழுத்த அல்லது பீசோ மின்பொருள்கள் என்று கூறுவர். சில குறிப்பிட்ட படிகங்களை எந்திர விசைகளால் விரிவடையச் செய்யும்பொழுதோ, இறுக்கப்படும்பொழுதோ அவற்றின் செங்குத்தாய் உள்ள எதிர்முகங்களில் எதிரெதிரானமின்னூட்டங்கள் சேகரிக்கப்பட்டு ஒரு மின்னழுத்த வேறுபாடு ஏற்படுகிறது. இதைப்**பீசோ மின்விளைவு** (piezoelectric effect) என்பர். அதே சமயம் உயர் அதிர்வெண் மின்னழுத்த வேறுபாட்டை படிகத்தில் ஏற்படுத்தும்போது செங்குத்தாய் உள்ள எதிர் முகங்களில் உயர் அதிர்வெண்கொண்ட ஒலிஅலைகள் உருவாகின்றன. இதை **எதிர் பீசோ மின் விளைவு** (inverse piezo eloctric effect) என்பர்.

பீசோமின்விளைவின் போது ஒவ்வொரு பக்கத்திலும் சேகரிக்கப்படும் மின்னூட்டங்களின் எண்ணிக்கை சமமாகவும் மேலும் அது செலுத்தப்படும் மொத்த எந்திர விசைக்கு அல்லது அழுத்தத்திற்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது. ஃபெரோ மின்படிகங்கள் பீசோமின் தன்மைகளை உடையதாயிருக்கின்றன. ஆனால், அனைத்துப் பீசோ மின் படிகங்களும் ஃபெரோ மின் பொருள்களாகிவிட முடியாது. பீசோ மின் பொருள்கள் மிக முக்கியத்துவம் வாய்ந்தவை. ஏனெனில், அவைகளால் எந்திர ஆற்றலை மின்ஆற்றலாகவோ, மின் ஆற்றலை எந்திர ஆற்றலாகவோ மாற்ற முடியும். குவார்ட்ஸ் (quartz) படிகம் நல்ல பீசோ மின் பொ ாகும். குவார்ட்ஸ் படிகம் அறுங்கோணப்பட்டகம் ஒன்றன் மேலும், கீழும் கூம்பகம் (ṛyramid) இருப்பதுபோன்ற அமைப்புடையது. பீசோ மின் ஆற்றல் மாற்றி (piezo electric transducer) உருவாக்கக் குவார்ட்ஸ் படிகத்தின் ஒளியியல் அச்சிற்கு (optical axis) செங்குத்தாயுள்ள அறுங்கோணத் தளத்தை சிறுசிறு தகடுகளாய் வெட்டி எடுக்கப்படும். இத்தகட்டில் எதிரெதிர் அறுங்கோண மூலைகளைச் சேர்க்கும் கோடு மின்அச்சாகவும் (electrical axis) எதிரெதிர் அறுங்கோணப் பக்கங்களின் நடுப்புள்ளிகளைச் சேர்க்கும் கோடு எந்திர அச்சாகவும் (mechanical axis) செயற்படும். எந்திர அச்சிற்கு இணையாய் அழுத்த விசையோ,

இழுவிசையோ கொடுக்கப்படும்போது மின்அச்சின் இருதிசைகளிலும் எதிரெதிர் மின்னூட்டங்கள் சேகரிக்கப்பட்டிருக்கும். எந்திரவிசைகளால் மின்னூட்டக் கடத்திகள் இடம்பெயர்கின்றன. அதனால் இருமுனைவுகள் தோன்ற முனைவாக்கம் நடைபெறுகிறது. ஆனால், இறுக்கு விசை (compressive force) ஒன்று பொருளின்மீது செயல்படுகையில் மொத்த இருமுனைவுத் திருப்புத்திறன் ஒரு திசையில் நிலைகொண்டும், இழுவிசை (tensile force) செயல்படுகையில் மொத்த இருமுனைவுத் திருப்புத்திறன் எதிர்த்திசையிலும் நிலைகொள்ளும். இவ்வாறாய் எந்திர விசைகளால் பொருளை விரிவடையச் செய்யும்போதும், இறுக்கப்படும்போதும் அதன் இருமுனைவுத் திருப்புத் திறன் மாறுவதும் அதனால், அதன் மின்முனைவாக்கம் மாறுவதை பீசோ மின்விளைவு என்பர்.



படம் 11.13 மையசமச்சீரற்ற இருபரிமாண அணிக்கோவைப்படிக மாதிரி

மையச் சமச்சீரற்ற அணிக்கோவையுடைய படிகங்கள்மட்டும் பீசோ மின்விளைவைக் கொண்டிருக்கின்றன. படம் 11.13 இல் மையச் சமச்சீரற்ற இருபரிமாண அணிக்கோவைப் படிக மாதிரி அமைப்புக் காண்பிக்கப்பட்டுள்ளது. இஃது ஓர் அறுங்கோண உருவமுடையது. அது $3m$ புள்ளிக்குழு (point group) சமச்சீருடையதாயுள்ளது. ஒவ்வொரு அணிக்கோவை புள்ளியிலும் மின்இருமுனைவுத் திருப்புத்திறன் தொகுபயன் சுழியாகும். படிகத்தில் 'x' திசையில் இழுவிசை செலுத்தப்படுவதாகக் கொள்வோம். அதனால் 'θ' எனும் கோணம் அதன்மதிப்பில் கூடி நேர்க்குறியுடைய 'y' திசையில் மின்முனைவாக்கத்தை ஏற்படுத்துகிறது. இதே சமயம் படிகத்தில் 'x' திசையில் அழுத்த விசை செயல்படுவதாய்க் கொள்வோம். அப்பொழுது 'θ'வின் மதிப்புக் குறைந்து மின்முனைவாக்கம் எதிர்க்குறியுடைய 'y' திசையில் நிகழ்கிறது. அதனால் பீசோ விளைவு படிகத்தின் சமச்சீரோடு சார்ந்துள்ளது என்பது தெரியவரும். மேலும் அது மையச் சமச்சீர் உடையபடிகங்களில் ஒருபொழுதும் நிகழாது. ஏனெனில் மையச் சமச்சீருடைய படிகங்களின் ஒவ்வொரு திசையிலும் உள்ள எதிரெதிர் முனைகள் சமமா (identical)யுள்ளன. அதனால், எந்திரவிசையினால் தூண்டப்பட்ட மின்இருமுனைவுத்திருப்புதிறன் எதிரெதிர்த் திசைகளில் இருந்து முனைவாக்க மதிப்பினைச் சுழியாக்கும். அதனால், எந்திர விசைகளால் மையச் சமச்சீருடைய படிகத்தில் பீசோ மின் விளைவு ஏற்படுவதில்லை.

குறிப்பு : தற்போது பீசோ மின்விளைவு மையச் சமச்சீர் உடைய சில ஃபெரோ மின்பொருள்களிலும் காணப்படுகிறது. இதற்கு மூலகாரணம் **மின்பரிமாண மாற்றம்** (electrostriction) ஆகும். மின்பரிமாண மாற்றம் என்பது ஒருமின்கடத்தாப்பொருளை மின்புலத்தில் கிடத்தும்போது அதன் முனைவாக்க அச்சினுக்கு இணையான நீளத்தின்

மதிப்பு மாறுபடுகிறது. மாறுதிசை மின்புலத்தில், அந்நீளவாக்கில் அதிர்வுகள் தோன்றுகின்றன. மாறு எந்திர விசையால் அப்பொருளில் மாறுமின்புலமும் தோன்றுகிறது.

பீசோமின் படிகங்களின் பயன்கள் :

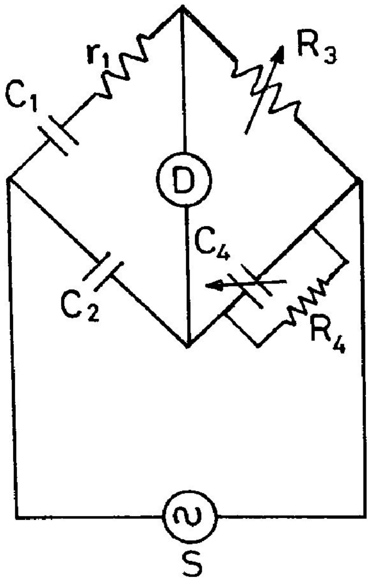
1. *பீசோ மின்படிகம் பல்வேறு அதிர்வு வகைகளில் அதிர்வுறக்கூடும். இவ்வதிர்வுகளின் அதிர்வெண்கள் படிகத்தின் மீட்சிக் குணங்களையும், பரிமாணங்களையும் சார்ந்திருக்கும். அதனால், இப்படிகமொன்றனை இரண்டு மின்முனைகளுக்கு இடையே பொருத்தி, அதன் இயல் அதிர்வெண்ணின் மதிப்பினையுடைய மாறுதிசை மின்புலத்தினை மின்முனைகளில் செலுத்தினால் படிகம் அதன் இயல் அதிர்வெண்ணில் பெரும வீச்சில் அதிரும். மேலும், ஒத்த அதிர்வெண்களால் ஒருங்கிசைவு* (resonance) *ஏற்பட்டு அதிர்வுகள் நன்கு நிலைப்பாடு* (stability) *உள்ளனவாய் இருக்கும். அதனால், மிகத்தாழ்ந்த நீள்விரி எண் உடைய குவார்ட்சு படிகங்கள் மிகஉயர்ந்த நிலைப்பாடுடைய அலையியற்றிகளில் பயன்படுத்தப் படுகின்றன. இத்தகைய அமைப்பு, வானொலி நிலையங்களில் வானொலி அல்லது ரேடியோ அதிர்வெண்களை நிலைப்படுத்தவும், மேலும், தரமான அதிர்வெண்* (standard of frequency)*ணாகவும் பயன்படுத்தப்படுகிறது.*

2. *எந்திர அதிர்வுகளை மின் அதிர்வுகளாகவும், மின் அதிர்வுகளை எந்திர அதிர்வுகளாகவும் மாற்றப் பீசோ மின்படிகங்கள் ஆற்றல் மாற்றிகளாய்ப் பயன்படுகின்றன. அதனால், உயர்மின் அதிர்வெண்ணுடைய மின்புலம் குவார்ட்சு படிகத்தில் செலுத்தப்பட்டு அது மீயொலி அதிர்வுகளாய்* (ultrasonic vibrations) *மாற்றப்படுகின்றது. மீயொலியின் பயன்களை யாவரும் அறிவர். மருத்துவத் துறையிலும், ஆழ்கடல் ஆய்வுகளிலும், தொழிற்சாலைகளிலும் மீயொலிக் கருவிகள் முறையே நோய்களைக் கண்டறியவும், தரைமட்டம் கண்டுபிடிக்கவும், உற்பத்தி செய்யப்பட்ட பொருள்களின் தரத்தை நிர்ணயிக்கவும் பயன்படுகின்றன.*

3. *மேலும், ஒலிஅலைகளை மின்னலைகளாக மாற்றும் நுண்பேசிகளிலும்,* (microphones) *நேரம் தாழ்ந்துஞ்சுற்று* (delay line)*களிலும் இவை பயன்படுத்தப்படுகின்றன. மேலும், செய்தித் தொடர்பு சாதனங்களில் இவை முக்கியப்பங்கு வகிக்கின்றன.*

11.9 *மின்கடத்தாப் பொருளின் மின்கடத்தாப்பொருள் மாறிலியைக் கண்டுபிடித்தல்*

மின்கடத்தாப் பொருள் மாறிலியை பின்வரும் இருமுறைகளின் மூலம் கண்டுபிடிக்கலாம். ஷெர்ரிங் சமனச் சுற்று (Schering bridge) (*படம்* 11.14 (*அ*)) *மின்கடத்தாப் பொருள்களின் மின்கடத்தாப்பொருள்மாறிலி அல்லது ஒப்புமை மின்மறுப்புத்திறன் கண்டுபிடிக்க உதவுகிறது. முதலில் மின்கடத்தாப் பொருளை* C_1 *எனும் மின்தேக்கியில் நுழைப்பதற்கு முன் அதன் மின்தேக்குத்திறனைச் சமனச்சுற்றின் புயங்களில்* (arms) *உள்ள மின்எதிர்ப்பு* (impedance)*களைச் சமன் செய்து கண்டுபிடிக்கவேண்டும்.*



C_1 – மின்தேக்குத்திறன் கண்டுபிடிக்கவேண்டிய மின்தேக்கி.

r_1 – மின்தேக்கி C_1ன் மின்னிழப்பைக் காட்டும் தொடரிணைப்பில் உள்ள மின்தடை.

R_3 – மின்தூண்டலில்லா மாறுமின்தடை.

C_4 – மாறு மின்தேக்கி

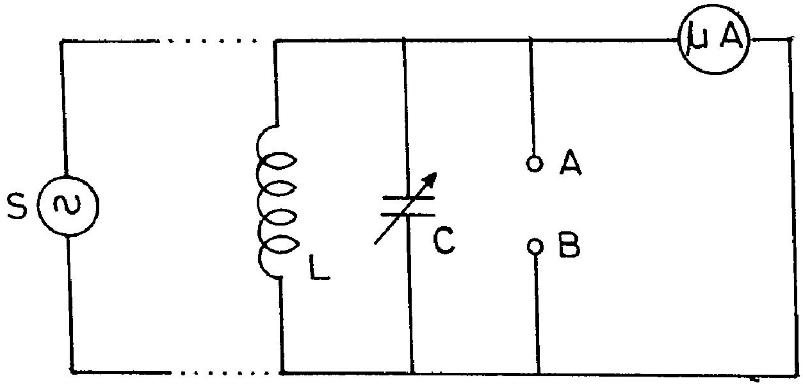
C_2 – தரமான மின்தேக்கி

R_4 – மின்தூண்டலில்லாமின்தடை

D – மாறுதிசை மின்னோட்ட பகுப்பான்

S – உயர் அதிர்வெண் அலையியற்றி.

(அ)



S – மாறு ஹார்ட்லி அலையியற்றி

L – மின்நிலைமச் சுருள்

C – மாறுமின்தேக்கி

$A - B$ – மின்தேக்குத்திறன் கண்டுபிடிக்க வேண்டியமின்தேக்கி இணைக்குமிடம்.

(ஆ)

படம் **11.14** (அ) ஷெர்ரிங் சமனச்சுற்று
(ஆ) மின்கடத்தாப் பொருள் மாறிலி காண உதவும் இசைவுறுசுற்று (tuned circuit)

பகுப்பானில் (detector) செல்லும் மின்னோட்டம் சுழியாகும்போது, $\dfrac{Z_1}{Z_3} = \dfrac{Z_2}{Z_4}$.

அஃதாவது,
$$\frac{\left(r_1 + \dfrac{1}{j\,\omega\,C_1}\right)}{R_3} = \frac{\dfrac{1}{j\,\omega\,C_2}}{\dfrac{R_4}{1 + j\,\omega\,R_4\,C_4}}$$

$$\left(r_1 + \frac{1}{j\,\omega\,C_1}\right) R_4 = \frac{R_3}{j\,\omega\,C_2}\,(1 + j\,\omega\,R_4\,C_4)$$

$$r_1\,R_4 - \frac{j\,R_4}{\omega\,C_1} = \frac{-j\,R_3}{\omega\,C_2} + \frac{R_3\,R_4\,C_4}{C_2}$$

மேற்கண்ட சமன்பாட்டில் கற்பனைப் பகுதிகளையும், மெய்ப்பகுதிகளையும் தனித்தனியே சமப்படுத்த, நமக்குக் கிடைப்பது,

$$r_1 = \frac{C_4}{C_2}\,R_3 \tag{A}$$

$$C_1 = \frac{R_4}{R_3}\,C_2 \tag{B}$$

எனவே சமன்பாடு (B)யிலிருந்து C_1க் கண்டுபிடிக்கலாம். R_4, C_2 ஆகியவை நிலையான மதிப்புகளிலிருப்பதால் மின்தடை R_3யின் மதிப்பு நேரடியாகவே C_1ன் மின்தேக்குத்திறனில் குறிக்கப்பட்டிருக்கும். சமனச்சுற்றை R_3, C_4 ஆகியவற்றின் மதிப்புகளை மாற்றி சமன் செய்ய வேண்டும்.

சமன்பாடு (A) மின்னாற்றல் இழப்பினைக் கண்டுபிடிக்க உதவுகிறது. அஃதாவது, மின்திறன்காரணி (power factor),

$$\tan\delta = \omega\,C_1\,r_1 = \frac{\omega\,R_4}{R_3}\,C_2 \cdot \frac{C_4}{C_2}\,R_3 = \omega\,C_4\,R_4$$

எனவே, ஆற்றலிழப்புக் கோணம் $\delta = \tan^{-1}(\omega\,C_4\,R_4)$. C_4ன் மதிப்பு நேரடியாகவே (பயன் படுத்தப்படும் அதிர்வெண்ணில்) மின்திறன் காரணி மதிப்பாய் குறிக்கப்பட்டிருக்கும். எனவே சமனச்சுற்றைச் சமன் செய்துவிட்டால், மின்கடத்தாப்பொருளின் மின்திறன் காரணி '$\tan\delta$'வையும் அளவீடு செய்யமுடியும்.

முதலில் மின்கடத்தாப் பொருள் இல்லாமல் C_1இன் மதிப்பினைக் கண்டுபிடிக்க வேண்டும். பின் மின்கடத்தாப்பொருள்மாறிலி கண்டுபிடிக்கவேண்டிய மின்கடத்தாப் பொருளை அதன் இருஇணைதகடுகளுக்கிடையே இடைவெளியில்லாமல் செருகி மறுபடியும் C_1இன் மதிப்பினைக் கண்டுபிடிக்கவேண்டும். இப்போது C_1இன் மதிப்பு மாறியிருக்கும். C_1 இன் புதிய மதிப்பினை C_1' எனக் கொள்வோம்.

அதனால் பொருளின் மின்கடத்தாப்பொருள் மாறிலி 'ε_r' $= \dfrac{C_1'}{C_1}$. மேலும், ஆற்றல் இழப்புக் கோணத்தின் மதிப்பினை வைத்துக் கொடுக்கப்பட்ட பொருளால் ஏற்படும் மின்னாற்றல் இழப்பினையும் கண்டுபிடிக்கலாம். மின்னாற்றல் இழப்பு $= V\,I\cos(90-\delta)$ என்பதில் $V =$ மின்னழுத்தம், $I =$ மின்னோட்டமாகும்.

வியாபார ரீதியில் மின்கடத்தாப்பொருள் மாறிலி கண்டுபிடிக்க உதவும் எளிய அமைப்புப் படம் 11.14 (ஆ)வில் காட்டப்பட்டுள்ளது. ஒரு ஹார்ட்லி அலையியற்றி (Hartely oscillator) பல்வேறு உயர் அதிர்வெண் மின்காந்த அலைகளை உருவாக்குகிறது. அவ்வலைகளின் அதிர்வெண்கள் அதில் உள்ள காட்டி (dial)யில் குறிக்கப்பட்டிருக்கும். அதற்கு அருகிலேயே ஒரு இசைவுறு சுற்றும் (tuned circuit) அதில் செல்லும் மின்னோட்டத்தை அளக்க ஒருமைக்ரோ அம்மீட்டரும் இணைக்கப்பட்டுள்ளன. இசைவுறு சுற்றில் ஒருநிலையான மதிப்புடைய மின்நிலைமச் சுருளும் (inductor), மாறுமின்தேக்கியும் பக்க இணைப்பில் உள்ளன. மாறுமின்தேக்கியின் பல்வேறு மதிப்புகள் அதிலுள்ள காட்டியில் குறிக்கப்பட்டிருக்கும். முதலில் சுற்றிலுள்ள '*A*'க்கும் '*B*'க்கும் இடையில் ஒன்றையும் இணைக்காமல் திறந்தபடி விடவேண்டும். அலையியற்றியில் ஒருகுறிப்பிட்ட அதிர்வெண்ணை வைத்து இசைவுறு சுற்றிலுள்ள மாறுமின் தேக்கியின் மதிப்பினை மாற்றி மைக்ரோ அம்மீட்டரில் அதிக மின்னோட்டம், மாறுமின்தேக்கியின் எந்த மதிப்பில் வருகிறது எனக் காணவேண்டும். அதிக மின்னோட்டம் செல்லும்போது அலையியற்றி அலையின் அதிர்வெண்ணும் இசைவுறு சுற்றின் அதிர்வெண்ணும் சமமாயிருக்கும். ஏனெனில், அதிக மின்னோட்டம் ஒருங்கிசைவால் வருகிறது. இப்போது மாறுமின்தேக்கியின் மதிப்பினை 'C_0' என வைத்துக் கொள்வோம். மின்கடத்தாப் பொருளாகக்காற்றுமட்டும் உள்ள ஓர் இணைதகடு மின்தேக்கியை எடுத்து 'A'க்கும் 'B'க்கும் இடையில் இணைக்கவேண்டும். இப்போது மைக்ரோ அம்மீட்டரில் மின்னோட்ட மதிப்புக்குறையும். மறுபடியும் மாறுமின்தேக்கியைச்சரி செய்து மைக்ரோ அம்மீட்டரில் அதே அதிக மின்னோட்டம் பாயுமாறு செய்யவேண்டும். பின் மாறுமின்தேக்கியின் புதியமதிப்பினைக்காண வேண்டும். இப்போது அதன் மதிப்பினை C_1 என வைத்துக்கொள்வோம். பிறகு 'A'க்கும் 'B'க்கும் இடையில் இணைக்கப்பட்ட இணைதகடு மின்தேக்கியில் கொடுக்கப்பட்ட மின்கடத்தாப் பொருளை இடைவெளியில்லாமல் செருக வேண்டும். அஃதாவது, மின்கடத்தாப் பொருளின் புறப்பரப்பும், இணைத்தகடுகளின் புறப்பரப்பும் சமமாயிருக்க வேண்டும். மறுபடியும் மாறு மின்தேக்கியைச் சரிசெய்து மைக்ரோ அம்மீட்டரில் அதிக மின்னோட்டம் பாயுமாறு செய்ய வேண்டும். இப்போது மாறுமின்தேக்கியின் மதிப்பை C_2 எனக் கொள்வோம். C_0, C_1, C_2 மதிப்புகளிலிருந்து பொருளின் மின் கடத்தாப்பொருள் மாறிலியைக் கண்டுபிடிக்க முடியும். அஃதாவது,

$$\varepsilon_r = \frac{C_0 - C_2}{C_0 - C_1}$$

இக்கருவியால் மின்கடத்தாப்பொருள் மாறிலியின் மதிப்பினை ஒவ்வொரு அதிர்வெண்ணிலும் காணலாம். மேலும், இக்கருவியைத் திடப்பொருள்களுக்கு மட்டுமில்லாது வாயு, திரவப் பொருள்களின் மின்கடத்தாப் பொருள்மாறிலியைக் கண்டு பிடிக்கவும் பயன்படுத்தலாம்.

11.10 மின்கடத்தாப் பொருள்களில் ஏற்படும் சீர்குலைவு (dielectric breakdown)

ஒரு மின்கடத்தாப் பொருள் அதன் மின்காப்புத்தடையை (insulation resistance) இழந்து அதனுள் அதிகமான மின்னோட்டம் பாய வழிவிடும்போது, அப்பொருள் சீர்குலைந்துவிட்டது என்கிறோம். ஒருமின்பொறியாளருக்கு, மின்கடத்தாப்பொருள் அதன் பண்புகளை இழந்து சீர்குலைந்து போவது மிகமுக்கியப் பிரச்சினையாயிருக்கும். மின்கடத்தாப் பொருள்களில் ஏற்படும் சீர்குலைவுகளில் பலவகைகள் உள்ளன.

அ.	இயல்பாய சீர்குலைவு	(Instrinsic breakdown)
ஆ.	வெப்பச் சீர்குலைவு	(Thermal breakdown)
இ.	மின்வேதியியல் சீர்குலைவு	(Electro chemical breakdown)
ஈ.	மின்னிறக்கச் சீர்குலைவு	(Discharge breakdown)
உ.	குறைபாட்டுச் சீர்குலைவு	(Defect breakdown)

அ. இயல்பாய சீர்குலைவு :

மின்கடத்தாப் பொருள்களில் மின்னழுத்தம் செலுத்தப்படும்போது மின்னூட்டங்கள் இடப்பெயர்வு அடைகின்றன என்று பார்த்தோம். மின்புல வலிமை கூடக்கூட, இடப்பெயர்ச்சியும் கூடிக்கொண்டே போகும். இதனால், பொருளின் பரிமாணமும் சிறிது மாறும். குறிப்பிட்ட அளவிற்குமேல் மின்புல வலிமை கூடினால் பொருளின் இயற்பியல்குணம் மாறி, மின்சீர்குலைவு ஏற்படும். அஃதாவது, பொருளில் அதிக மின்னோட்டம் பாயும். ஓரலகு தடிமனுள்ள பொருளில் மின்சீர்குலைவு ஏற்படத் தேவையான மின்னழுத்தமே அம்மின்கடத்தாப் பொருள்வலிமை (dielectric strength) எனக் கூறப்படும்.

மின்கடத்தாப் பொருள்களில் செலுத்தப்படும் மின்புல வலிமை மிக அதிகமாகும்போது, இணைதிறப்பட்டையிலுள்ள எலெக்ட்ரான்கள் மின்புலத்தின் உதவியால் ஆற்றல் இடைவெளியைக் கடந்து கடத்துப்பட்டையை அடைகின்றன. இவ்வாறு எலெக்ட்ரான்கள் வெளியேற முற்பட்டவுடன் இச்செயல் தொடர்ந்து நடைபெற மின்னோட்டம் பலமடங்கு மிகுதியாகிறது. இந்நிலையில் உள்மின்புலத்தின் வலிமை ஒரு செ.மீ.க்கு ஒருமெகாவோல்ட்வரை இருக்கும். இவ்வாறு இணைதிறப்பட்டையிலிருந்து எலெக்ட்ரான்கள் வெளியேறுவதை "**உட்புல எலெக்ட்ரான் உமிழ்வு**" (internal field electron emission) என்பர். அதிகமான மின்னோட்டம் பாய்வதால் உண்டாகும் மின்சீர்குலைவைத்தான் **இயல்பான அல்லது ஜீனர் சீர்குலைவு** (intrinsic or zener breakdown) என்கிறோம். இவ்வாறு தோன்றும் எலெக்ட்ரான்கள் அதி மின்புல வலிமையால் முடுக்கம் பெற்று, மூலக்கூறு அல்லது அணுக்களின் சகபிணைப்பில் மோதி அவற்றை உடைத்துவிடுகின்றன. இவற்றின் விளைவாய் மேலும் துளைகளும், எலெக்ட்ரான்களும் விடுவிக்கப்பட்டு மின்னோட்டம் மேலும் மிகுதியாகிறது. மேன்மேலும் சகபிணைப்புகள் உடைந்துகொண்டேபோய், இறுதியில் சீர்குலைவில் முடிகிறது. இதனையே சரிவுச்

சீர்குலைவு (avalanche breakdown) என்பர். மின்கடத்தாப் பொருள்களில் உள்ள வேற்றுப் பொருள் அணுக்கள் அல்லது மூலக்கூறுகள், ஆற்றல் இடைவெளியில் மிகுதியான ஆற்றல் மட்டங்களை ஏற்படுத்தி இந்த இயல்பாய சீர்குலைவு குறைந்த மின்னழுத்தத்தில் ஏற்பட உதவிசெய்கின்றன.

சிறப்பியல்புகள் :

1. இயல்பாய சீர்குலைவு குறைந்த வெப்பநிலைகளில் கூட ஏற்படும்.
2. இஃது ஏற்பட மின்புல வலிமை அதிகமாயிருக்க வேண்டும்.
3. பெரும்பாலும் இது மெல்லிய மின்கடத்தாப் பொருள்களில் ஏற்படுகிறது.
4. மேலும் இது பொருளில் மின்முனைகளின் அமைப்பு, பொருளின் உருவ அமைப்பு ஆகியவற்றைச் சார்ந்து இருப்பதில்லை.

ஆ. வெப்பச் சீர்குலைவு :

உயர்ந்த வெப்பநிலையில் இணைதிறப் பட்டையிலுள்ள எலெக்ட்ரான்கள் வெப்ப ஆற்றலை உட்கவர்ந்து கடத்துப் பட்டையை அடைகின்றன. மேலும், இவ்விதமாய் வெளியேறிய எலெக்ட்ரான்கள் அதிக ஆற்றலுடன் இருப்பதால் அணுக்களின் சக பிணைப்பினை உடைத்துவிடுகின்றன. இதன்மூலம்அநேக எலெக்ட்ரான்களும், துளைகளும் கிடைக்கும். இவ்விதமாய்ப் பொருளில் சீர்குலைவு ஏற்படும். பொருளில் வெப்பநிலை உயரப் பொருளைத் தனியாக வெப்பப் படுத்த வேண்டுவதில்லை. ஏனெனில், மின்னாற்றல் இழப்பு அதிகமாக உள்ள மின்கடத்தாப் பொருள்களில் அந்த இழப்பு வெப்ப ஆற்றலாய் மாறி வெளியேறும். அவ்வாறு வெளிப்படும் வெப்ப ஆற்றல் மின்னாற்றல் இழப்பினை விடக் குறைவாயிருந்தால் பொருளில் வெப்பநிலை கூடிக்கொண்டே போய்ச் சிறிது நேரத்தில் பொருள் உருகத்தொடங்கும். அதனால் அதிக மின்னோட்டம் பாயத் தொடங்கும். உடனே பொருளில் சீர்குலைவு ஏற்படும்.

சிறப்பியல்புகள் :

1. இது உயர் வெப்பநிலைகளில் மட்டும் ஏற்படும்.
2. சீர்குலைவு ஏற்படக் காரணமாயுள்ள மின்புல வலிமை, பொருளின் அமைப்பினையும், அளவையும் பொருத்தது. மேலும், அதில் இணைக்கப் பட்டுள்ள மின்முனைகளின் வெப்பக் குணங்களையும் பொருத்தது.
3. சீர்குலைவு நேரம் ஏறத்தாழ மில்லி செகண்டுகளில் இருக்கும்.
4. சீர்குலைவு குறைந்த மதிப்புள்ள மாறுதிசைமின்புலங்களில்கூட ஏற்படும். ஏனெனில், மின்னாற்றல் இழப்பு அதிர்வெண்ணிற்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது. நேர்த்திசை மின்புலத்தில் சீர்குலைவு ஏற்பட வலிமை மிக்க மின்புலம் தேவை.

இ. மின்வேதியியல் சீர்குலைவு :

வேதியியல், மின்வேதியியல் சீர்குலைவுகள் வெப்பச் சீர்குலைவோடு நெருங்கிய தொடர்பு கொண்டவை. பொருளின் வெப்ப உயர்வு வேதியியல் மாற்றங்களை விளைவிக்கிறது. மேலும், வெப்ப உயர்வால் அயனிகளின் நகர்வுத் திறன் கூடுவதால் மின்வேதியியல் மாற்றமும் நிகழ்கிறது. அயனிகளின் நகர்வு திறன் கூடும்போது கசிவு மின்னோட்டம் (leakage current) கூடிச் சீர்குலைவை உண்டுபண்ணும். வேதியியல் விளைவு சிறிதுசிறிதாய் மின்காப்புத் தடை மதிப்பினைக் குறைத்து முடிவில் சீர்குலைவை உண்டுபண்ணும். மேலும், வேதியியல் மாற்றம், மின்புல வலிமையால் மட்டுமில்லாது வேறுபல வழிகளிலும் வருகின்றது.

1. சில மின்கடத்தாப் பொருள்கள் காற்று அல்லது ஓசோனில் ஆக்ஸைடுகளாய் மாறுகின்றன. குறிப்பாய் இரப்பரை எடுத்துக்கொண்டால் காற்றில் அஃது ஆக்ஸைடாய், மாறுவதோடு ஓசோன் சூழ்நிலையில் அது பிளவுபடத் தொடங்குகிறது. அதேபோல் பாலீத்தின் கடுமையான வெயிலில் ஆக்ஸைடாய் மாறுகிறது. இங்ஙனம் ஆக்ஸைடாய் மாறுவதால் மின்கடத்தாப் பொருளின் தன்மைகள் குறையத் தொடங்குகின்றன.

2. சில கரிம (organic) மின்கடத்தாப் பொருள்கள் உயர்வெப்பநிலைகளில் செயற்படும்போது அவற்றின் வேதியியல் குணங்களில் உள்ள நிலைப்பாடு (stability) குறைகிறது.

3. செல்லுலோஸ் எஸ்டர்கள் (cellulose esters) போன்ற பொருள்களில் ஈரப்பதமும் (humidity) வெப்பமும் அதிகமாயிருக்கும் போது அதன் மின்னியற் குணங்களும், எந்திரவியற் குணங்களும் குறையத் தொடங்குகின்றன.

4. மின்காப்பிடப்பட்ட பொருள்களோடு, வேற்றுப்பொருள்களை இணைக்கும்போது சில வேதியியல் மாற்றங்கள் நிகழ, அவற்றின் தன்மைகள் குறையத் தொடங்குகின்றன.

இங்ஙனம் பொருள்களின் வேதியியற் குணங்களின் மாற்றத்தால் எந்திரவியற் குணங்களும் மின்னியற் குணங்களும் மாறி, முடிவில் சீர்குலைவு ஏற்படும்.

மின்புலவலிமையினால் மின்கடத்தாப் பொருளின் அயனிகள், உலோக மின்முனைகளை (metallic electrodes) அடைந்து, அம் மின்முனைகளின்மீது வேதியியல் முறையில் செயல்புரிந்து வாயு அல்லது சில பொருள்களை உற்பத்தி செய்கின்றன. இங்ஙனம் ஏற்படும் மின்வேதியியல் விளைவுகள் பொருளின் வேதியியற் குணங்களுக்கும் மின்னியற் குணங்களுக்கும் மிகுந்த தொல்லைகள் கொடுப்பவை. மின் வேதியியல் விளைவுகளின் செறிவு, பொருளில் ஏற்படும் கசிவு மின்னோட்டம், அயனிகளின் அடர்த்தி, வெப்பநிலை, நிலையான மின் இருமுனைவுகள் ஆகியவற்றின்மூலம் தீர்மானிக்கப்படுகிறது. மின்வேதியியல் மாற்றம் நிகழாமல் இருக்க மின்காப்பிடப்பட்ட பொருள்களில் வேற்றுப் பொருள்களைக் கலக்கக் கூடாது. உயர்வெப்பநிலைகளில் மின்கடத்தாப் பொருள்கள் செயல்படக்கூடாது. பொருளின் மேல் நிலையான இருமுனைவுகள் உள்ள பொருள்கள்

மெல்லேடு (thin layer)களாய்ப் படியாமல் பார்த்துக்கொள்ள வேண்டும். அங்ஙனம் அவை படிந்தால் மிகுதியான கசிவு மின்னோட்டம் ஏற்பட்டு சீர்குலைவு நிகழும்.

ஈ. மின்னிறக்கச் சீர்குலைவு :

மின்கடத்தாப் பொருள்களில் வெற்றிடங்களும் சிறுபிளவுகளும் உள்ளே இருக்கும்போது அவற்றில் வாயு அல்லது காற்று நிறைந்திருக்கும். வாயுக்களுக்கு அயனியாக்க மின்னழுத்தம் திண்மப் பொருள்களைவிடக் குறைவு. அதனால், வாயுக்களில் அணுக்கள் முதலில் அயனியாக்கப்படுகின்றன. இந்த வாயு அயனிகள் மோதலின்மூலம் திண்ம அணுக்களின் சக பிணைப்பினை உடைக்கின்றன. இங்ஙனம் குறைந்த அளவு மின்னழுத்தத்திலேயே சீர்குலைவு ஏற்பட முடியும். மேலும், வெற்றிடத்தில் மின்னிறக்கம் நடைபெறும்போது வெப்பம் உண்டாகி அது வெற்றிடத்தை சுற்றியுள்ள பகுதிகளைக் கரியாக்கிவிடும். இதனால். மின்கடத்தாப் பொருளின் மின்காப்புத்தடை (insulation resistance) குறைகிறது. அதனால் ஒருமின்கடத்தாப் பொருளின் மின்காப்பின் வாழ்வு நேரம் அதனுள் நடக்கும் உள்மின்னிறக்கங்களின் எண்ணிகையைப் பொறுத்துள்ளது. அஃதாவது, செலுத்தப்படும் மின்னழுத்தத்தின் அதிர்வெண்ணைச் சார்ந்துள்ளது.

உ. குறைபாட்டுச் சீர்குலைவு :

சிலமின்கடத்தாப் பொருள்களின் புறப்பரப்பில் உலோகத் தூசிகள் அல்லது மாசுக்கள் சேருவதால் அப்பொருளின் மின்காப்புவலிமை குறைந்து, சீர்குலைவு ஏற்படும். மேலும், பொருளின் கண் உள்ள பிளவுகளிலோ, வெற்றிடங்களிலோ நீரின் மூலக்கூறுகள் அல்லது எவையேனும் வேற்றுப் பொருள்கள் தங்கினால் மின்னிறக்கம் ஏற்பட்டுச் சீர்குலைவு ஏற்படும். அதனால் ஒருபொருள் நல்ல மின்கடத்தாப் பொருளாய்ச் செயல்படப் பின்வரும் குணங்களை அது கொண்டிருக்க வேண்டும்.

1. அபிரகத்தை (mica)ப் போல் மின்கடத்தாப்பொருள் வலிமை மிகுதியாயிருக்க வேண்டும்.
2. எஃகினைப்போல் எந்திர வலிமை மிகுதியாய் இருக்க வேண்டும்.
3. சிலிக்கா (Silica)வைப் போல் தீயினால் பாதிக்கப்படாத பொருளாயிருக்க வேண்டும்.
4. பிளாட்டினத்தைப்போல் வேதியியல் மாற்றங்களில் ஈடுபடாத பொருளாயிருக்க வேண்டும்.
5. பாராபின் மெழுகுபோல் நீரோடு சேராப் பொருளாயிருக்க வேண்டும்.
6. கந்தகத்தைப்போல் புறப்பரப்பு மின் எதிர்ப்புத் திறனும் பரும மின் எதிர்ப்புத் திறனும் மிகுதியாயிருக்க வேண்டும்.
7. எபோனைட் (Ebonite)டைப்போல் புறப்பரப்புச் செம்மையாயிருக்க வேண்டும்.
8. வெப்பங் கடத்தும் திறன் மிகுதியாயிருக்க வேண்டும்.
9. வெப்ப விரிகுணகம் குறைவாயிருக்க வேண்டும்.
10. நீர்மத்துளிகளை (moisture) உட்கவருதல் மிகவும் குறைவாயிருக்க வேண்டும்..

11.11 மின்காப்புப் பொருள்களின் (insulating materials) குணங்கள்

மின்காப்புப் பொருள்கள் அல்லது காப்பான்கள் மின்கடத்தாப் பொருள்களேயாகும். இவை பெரும்பாலும் மின் துறையில் பயன்படுகின்றன. இவை மிகுதியான மின்எதிர்ப்புத் திறனும், எதிர்வெப்பமின்தடைக்குணகமும் உடைய அலோக (non metallic)ப் பொருள்களாகும். மின்காப்புப் பொருளின் முனைகளில் மின்னழுத்த வேறுபாடு ஏற்படுத்தினால் அதனுள் மின்னோட்டம் பாயவிடாது தடுப்பதே இதன் வேலையாகும். பெரும்பாலும் மின்காப்புப் பொருள்களின் தரத்தைப் பின்வரும் குணங்களின் மூலம் அறியலாம்.

1. **மின் குணங்கள்** :

(அ) மின்காப்புத் தடை (insulation resistance) :

இரண்டுவகையான மின்காப்புத் தடைகள் உள்ளன.

i) பரும மின்தடை (volume resistance)

ii) புறப்பரப்பு மின்தடை (surface resistance)

$$\text{பரும மின்தடை } R_V = \rho_V\, l/a$$

இதில் ρ_V என்பது பரும மின் எதிர்ப்புத்திறன் (ஓம்- மீட்டர்); 'l' என்பது நீளம், 'a' என்பது பறப்பரப்பு. நாம் முன்பே இதுபற்றி நன்கு தெரிந்துள்ளோம். மின்காப்புப் பொருளின் புறப்பரப்பில் பாயும் மின்னோட்டத்திற்கு (I_s) கிடைக்கும் மின்தடையைப் புறப்பரப்பு மின்தடை என்பர். அதனால் புறப்பரப்பு மின் எதிர்ப்புத் திறன் என்பது மின்காப்புப் பொருளின் தளத்தின்கண் உள்ள ஓரலகு பரப்பின் மின்தடையாகும். அதன் அலகு ஓம்/மீ^{2}. அதனால், புறப்பரப்பு மின்தடை

$$R_a = \rho_a/lb$$

இதில் 'l' என்பது மின்கடத்துபாதையின் நீளம் ; 'b' என்பது மின்கடத்து பாதையின் அகலம் ; ρ_a என்பது புறப்பரப்பு மின்எதிர்ப்புத்திறன்.

ஆ. மின்கடத்தாப்பொருள் வலிமை (dielectric strength) :

ஓரலகு தடிமனுள்ள மின்காப்புப் பொருளில், மின்சீர்குலைவு உண்டாகச் செலுத்தப்படும் சிறும மின்னழுத்தமே மின்கடத்தாப் பொருள்வலிமை எனக் கூறப்படுகிறது. குறிப்பாய்க் காற்றுக்கு சீர்குலைவு மின்னழுத்தம் 3 மெகா வோல்ட்/மீட்டர் ஆகும். அதாவது, 1 மீட்டர் தடிமனுள்ள காற்றுப்பெரும மதிப்பாய் 3 மெகா வோல்ட் மின்னழுத்தம் வரை சீர்குலைவு ஏற்படாமல் காப்பானாய் நிலைத்திருக்கும் ; 3 மெகா வோல்ட்டுக்குமேல் மின்னழுத்தம் கூடினால் காற்றின் மின்காப்புத் திறமை குறைந்து சீர்குலைவு ஏற்படும்.

இ. மின்கடத்தாப் பொருள் மாறிலி (dielectric constant) :

மின்கடத்தாப்பொருள் மாறிலி பொருளால் உட்கவரப்படும் மின்தகைவின் பங்கைத் தீர்மானிக்கிறது. குறிப்பாய் வெற்றிடத்தோடு ஒப்பிட, பொருளின் கண் ஏற்படும் முனைவாக்க அளவைத் தீர்மானிக்கும் குணகம் மின்கடத்தாப் பொருள் மாறிலியாகும். முனைவாக்கம் அதிக அளவில் நடந்தால் அம்மாறிலியின் மதிப்பும் அதிகமாய் இருக்கும். முனைவாக்கமின்புலம் அதிகமாய் இருக்கும் போது செலுத்தப்பட்ட மின்னழுத்தத்தனால் ஏற்படும் மின்னோட்டம் பொருளில் சுழியென இருக்கும்.

ஈ. மின்கடத்தாப் பொருள் இழப்பு (dielectric loss) :

ஒரு மின்கடத்தாப் பொருளில் மாறுதிசை மின்னழுத்தம் செலுத்தப்படும்போது மின்ஆற்றல் பொருளால் உட்கவரப்படுகிறது. அங்ஙனம் உட்கவரப் பட்ட ஆற்றல், வெப்ப ஆற்றலாய் வெளியேற்றப்படுகிறது. வெளியேறும் வெப்ப ஆற்றலே அப்பொருளின் மின்கடத்தாப் பொருள் இழப்பு அல்லது மின்னாற்றல் இழப்பு என்பர். பெரும்பாலும் நல்ல மின்கடத்தாப் பொருள்களில் மின்னாற்றல் இழப்புக் குறைவாயிருக்கும்.

2. **எந்திர குணங்கள்** :

மின்கடத்தாப்பொருள்களின் எந்திர வலிமை வெப்பநிலை, ஈரப்பதன் (humidity), பொருளின் கரைதிறன், அடர்த்தி, நீர்மத்துளிகளை உட்கவரும் தன்மை (moisture absorption), சீர்மை (uniformity), கடைசல் தன்மை (machinability) ஆச்சுவார்ப்புமை (mouldability), பாகுநிலை (viscosity), துளைமை (porosity), பரப்பு இழுவிசை (surface tension) ஆகியவற்றைச் சார்ந்துள்ளது.

3. **வெப்பக் குணங்கள்** :

மின்கடத்தாப் பொருள்களின் வெப்பக் குணங்கள் உருகுநிலை, வெப்பவிரி குணகம், வெப்பங்கடத்துந் திறன், தீப்பிடிக்குந் தன்மை, மென்மைநிலைப் புள்ளி (softening point), வெப்பத்தடை (heat resistance) ஆகியவற்றைச் சார்ந்துள்ளன. குறிப்பாய் மின்சீர் குலைவைத்தடுக்கப்பொருளின் வெப்பங்கடத்துந்திறன் மிகுதியாய் இருக்கவேண்டும்.

4. **வேதியியற் குணங்கள்** :

வேதியியற் குணங்கள் வேதியியற் தடை (chemical resistance), நீரோடு சேரும் தன்மை, வயது, பிறபொருள்களோடு சேரும் தன்மை ஆகியவற்றைப் பொருத்து அமைகின்றன.

மேலும், பொறியியற் துறைக்கு முக்கியமில்லாததும் ஆனால், பொருள் வாங்குவோரைத் திருப்திபடுத்துதற்குமான சில குணங்கள் இருக்கின்றன. அவை பொருள்களின் தோற்றம், நிறம், படிகத் தன்மை ஆகியவையாகும்.

11.12 மின்காப்பினைப் பாதிக்கும் காரணிகள்

பெரும்பாலும் மின்காப்புத் தடையின் மதிப்புப் பின்வரும் காரணிகளால் பாதிக்கப்படுகிறது.

(i) **வெப்பநிலை** :

வெப்பநிலை உயரஉயர மின்காப்புத் தடையின் மதிப்புக் குறைந்துகொண்டே செல்லும். உதாரணமாய் இந்தியா இரப்பரின் வெப்பநிலையை 15°C மிகுதிப்படுத்தினால் அதன் மின்காப்புத் தடை பாதியாய்க் குறைந்துவிடுகிறது.

(ii) **ஈரப்பதன்** :

நீர்மத் துளிகள் பொருளில் படிவதால் மின்காப்புத் தடையின் மதிப்புக் குறைகிறது.

(iii) **செலுத்தப்படும் மின்னழுத்தம்** :

செலுத்தப்படும் மின்னழுத்தம் உயர உயர மின்காப்புத்தடையின் மதிப்பும் குறைந்துகொண்டே செல்லும்.

(iv) **வயது** :

மின்காப்புத் தடையின் மதிப்புப் பொருளின் வயதைச் சார்ந்துள்ளது. அஃதாவது, பொருளின் வயது கூடக்கூட, மின்காப்புத் தடையின் மதிப்பும் குறைந்துகொண்டே செல்லும்.

ஒருமின்கடத்தாப் பொருளின் மின்காப்புக் குணங்கள் குறையத் தொடங்கினால் கூடிய விரைவில் சீர்குலைவு ஏற்பட வாய்ப்புண்டு. மின்கருவிகள் பழுதடைதற்கு முக்கியக் காரணம், மின்காப்பின் மதிப்பு மிகக் குறைவாய் மாறிவிடுதலாகும். ஒருகுறிப்பிட்ட வேலைக்கு நல்லதொரு மின்காப்புப் பொருளைத்தேர்ந்தெடுப்பது மிகமுக்கியம். ஏனெனில், மின் கருவியின் வாழ்வு இதனைச் சார்ந்துதான் உள்ளது.

11.13 சில முக்கிய மின்காப்புப் பொருள்கள்

அ) திண்ம மின்காப்புப் பொருள்கள் : அபிரகம், கல்நார் (asbestos) பி.வி.சி., பாலித்தீன், பீங்கான் பொருள்களான கண்ணாடி, போர்சிலைன் (porcelain), பஞ்சு, பட்டு, மரப்பலகை ஆகியவை முக்கிய மின்காப்புப் பொருள்களாகும்.

அபிரகம் அலுமினிய சிலிகேட்டின் கனிமச்சேர்மமாகும். அதனோடு மக்னீசிய சிலிகேட்டும், சோடாப் பொட்டாஷ் சிலிகேட்டும் உள்ளன. அதற்கு மின்காப்பு வலிமை மிக அதிகமாயுள்ளது; அஃது ஒரு வலுவான பொருளும் ஆகும். மேலும், அது நீர்மத்துளிகளால் பாதிக்கப்படாததொன்று ஆகும். அபிரகம் அனைத்துத் துறைகளிலும் மிகுதியாய்ப் பயன்படுத்தப்படும் பொருளாகும். மேலும், அதனைக் கல்நார், கண்ணாடி ஆகியவற்றுடன் சேர்ந்து மிகஉயர்ந்த வெப்பநிலைகளில் கூட அதன் மின்கடத்தாமைக் குணம் மாறாமலும், சீர்குலைவு ஏற்படாமலும் பயன்படுத்தலாம். ஆனால் அவ்வித மிக உயர்ந்த வெப்பநிலைகளில் பாலிமர்கள் போன்ற இதர மின்காப்புப் பொருள்களைப்

பயன்படுத்த முடியாது. அபிரகத்தகடுகள் மின் காப்பான்களாக திசைமாற்றி (commutator)களிலும், உயர் மின்தேக்குதிறன்கொண்ட மின்தேக்கிகளில் மெல்லிய தகடு வடிவங்களில் மின்கடத்தாப் பொருள்களாயும் பயன்படுகின்றன. உயர் மின்னழுத்த மாறுமின்னாக்கிகளில் (alternators) உள்ள நிலைச் சுருள்களில் (stator coils) தடித்த அபிரக நாடா (tape) பயன்படுகிறது. மேலும் அது மின்இரும்புப் பெட்டி (electric iron box)களிலும், வெப்பத் தட்டுகளிலும் (hot plates) மிகுதியாய்ப் பயன்படுகிறது. அபிரக நுண்தகடுகள் (flakes) ஒட்டும் தன்மையுள்ள பொருளோடு சேர்ந்து மின்னோடியினுடைய காடியின் உள்வரிபூச்சிகளிலும் (motor slot lining), மின்மாற்றிகளிலும் (transformers) பயன்படுகின்றன.

பீங்கான்கள் (Ceramics) :

"குயவரின் களிமண் (clay)" என அழைக்கப்படும் பீங்கான் மண்பொருள்களின்மேல் நெருப்புச் செயல்படுவதன்மூலம் தயாரிக்கப்படுகிறது; பீங்கான் கடினமாயும், வலுவுள்ளதாயும் இருக்கிறது. உயர்ந்த வெப்பநிலைகளிலும் கூடச்சீர்குலைவு ஏற்படாமல் மிகுந்த நிலைப்பாடு உடையது. களிமண் பொருள்கள், தீத்தடுப்புப் பொருள்கள், கண்ணாடிகள் என்று மூன்று வகைகளாய்ப் பீங்கான் பொருள்களைப் பிரிக்கலாம். போர்சிலைன் களிமண் பொருள்களில் மிகமுக்கியமானது. மேலும், அலுமினா முக்கியத் தீத்தடுப்புப் பொருள் ஆகும். பீங்கான் பொருள்களுக்கு ஈரப்பதனால் பாதிப்பு ஏதும் ஏற்படுவதில்லை. போர்சிலைன் மின்அடுப்புகளிலும், மின் கருவிகளிலும், இணைப்பிகள் (switches), செருகிகள் (plugs), உருகிதாங்கிகள் (fuse holders), பிடிப்பான்கள் (sockets), ஆகியவை தயாரிக்கவும், தொலைபேசி மின்காப்பிகளாயும் பயன்படுகின்றன. மேலும், அலுமினா மிக உயர்ந்த வெப்பநிலையுள்ள உலைகள் செய்யப்பயன்படுகிறது. அலுமினா என்பது அலுமினியம் ஆக்ஸைடாகும். சிலிக்காக் கண்ணாடி (silica glass), இழைக் கண்ணாடி (fibre glass), பைரெக்ஸ் என வழங்கப்படும் போரோசிலிக்கேட் கண்ணாடி ஆகியவை முக்கியக் கண்ணாடி வகைகளாகும். கண்ணாடி கடினமாயும், நொறுங்கும் தன்மையுடையதாகவும் உள்ளது. மேலும், நீர், கரிம கரைப்பான்கள் ஆகியவற்றில் கரையாது. அதில் மின்னாற்றல் இழப்பு மிகக் குறைவு. மேலும், அது நல்ல, எந்திர வலிமையும் கொண்டுள்ளது. கண்ணாடிகள் மின்கடத்தாப் பொருள்களாய் மின்தேக்கிகளில் பயன்படுகின்றன. வானொலிக்கருவியில் உள்ள வெற்றிடக் குழல்கள் (vacuumtubes), தொலைக்காட்சி குழல்கள் (picture tubes), மின்விளக்குகள் ஆகியவற்றை உருவாக்கவும் பயன்படுகின்றன. அறிவியல் கருவிகள் செய்யவும் பயன்படுகின்றன. 100 கிலோ வோல்ட்டுக்கும் மேலேயுள்ள அதிமின்னழுத்த மின்வழிகளில் கடினப்படுத்தப்பட்ட கண்ணாடி மின்காப்பானாகப் பயன்படுத்தப்படுகிறது.

பீங்கான்கள் மின்காப்பான்களாய் மட்டுமில்லாமல் தொழில்துறையில் வேறுபல பயன்களுக்கும் பயன்படுகின்றன. குறிப்பாய் அழுத்த மின் ஆற்றல் மாற்றிகளாய்ப் பேரியம் டைடனேட் கலந்த செராமிக் '*A*', செராமிக் '*B*' பயன்படுகின்றன. மீயொலிகளை உற்பத்தி செய்ய மேற்கண்ட பொருள்கள் பயன்படுகின்றன. தற்போது பரப்பு ஒலி அலைகளை (surface acoustic wave) உற்பத்தி செய்யும் பொருள்களான லித்தியம் நியோபேட் ($LiNbO_3$), லித்தியம் டான்டலேட் ($Li\,Ta\,O_3$), பேரியம் சோடியம் நியோபேட்

($Ba_2 Na Nb_5 O_{15}$) போன்றவை பீங்கான் பொருள்களாகும். இவை செய்தித் தொடர்பு துறையில் மின்–ஒளி பண்பேற்றி (electrooptic modulator) களாகவும் இரண்டாம் சுர இயற்றி (second harmonic generator) களாகவும், நேரம் தாழ்த்துஞ் சுற்றுகளிலும் (delay line circuits) நினைவுச் சுற்றுகளிலும் (memory circuits), அதிர்வெண் வடிப்பான்களிலும் (frequency filters), ஒத்திசைவு இயற்றிகளிலும் (resonators) பயன்படுகின்றன. மேலும் பீங்கான் வகை மீக்கடத்திகள் தற்போது பரவலாகிக் கொண்டிருக்கின்றன.

பீங்கான் வகை எந்திர உபகரணங்களை (tools) மூன்று வகைகளாய்ப் பிரிக்கலாம்: (1) தூய ஆக்ஸைடு பீங்கான். எடுத்துக்காட்டு : அலுமினா. இதில் மிகக் குறைந்த வெப்பங் கடத்துந்திறனும் வெப்ப அதிர்ச்சியைத் தாங்க முடியாதத் தன்மையும் உள்ளது. (2) ஆக்ஸைடு, கார்பைடு, ஹைட்ரைடு கலந்த கலப்புப் பீங்கான். இது வெப்ப அதிர்ச்சியைத் தாங்கும் தன்மையும், அதி வெப்பநிலைகளில் கடின தன்மையை இழக்காத்தகுதியும் கொண்டது. அதனால், அதிவேக, அதிவெப்பநிலைகளில் வேலை செய்யும் இயந்திரங்களில் உபகரணமாய்ப் பயன்படுகிறது. (3) சிலிக்கான் நைட்ரைடுகள். இவை மிகக் குறைந்த வெப்ப விரிவெண்ணையும் மிக அதிகமான வெப்ப அதிர்ச்சித் தடையையும் கொண்டுள்ளன. அதனால் இவ்வகைப் பொருள்கள் உலோகங்களை மிகவேகமாக வெட்டவும், கடின பொருள்களை வெட்டவும் பயன்படுகின்றன. குறிப்பாய் மிக உறுதியான உபகரணங்கள் இவற்றிலிருந்து தயாரிக்கப்படுகின்றன.

செர்மெட் (Cermet) என்னும் கலப்புஇன பொருள்கள் (composite materials) பீங்கானையும், உலோகத்தையும் சேர்த்து உருவாக்கப்படுகின்றன. இவற்றில் உலோகம் ஒட்டியாக்கி (binder)யாய் வேலைசெய்கிறது; மாவு உலோகவியல் (powder metallurgy) மூலம் உற்பத்தி செய்யப்படுகின்றன. இதில் எந்திரப்பண்புகள் சிறந்த நிலையில் உள்ளன; மேலும், உயர்வெப்பநிலைகளில் வெப்ப, எந்திரப் பண்புகளை இழக்காத் தன்மையையும், வேதியியற்பண்பு நிலைத்தன்மையையும், அரிமானத் தடையையும் கொண்டுள்ளன. இவற்றை இரும்பு, டங்ஸ்டன், கோபால்ட் கலந்த பீங்கான் ஆக்ஸைடுகளுள்ள செர்மேட்கள், இரும்பு, நிக்கல், கோபால்ட் கலந்த பீங்கான் கார்பைடுகளுள்ள செர்மேட்கள் என இருவகைகளாகப் பிரிக்கலாம்.

பாலிமர்கள் (அல்லது) பலபடிச்சேர்மங்கள் :

பாலிமர் என்பது நீண்ட சங்கிலித் தொடர் அமைப்பினை உடைய கரிம மூலக்கூறுகளால் ஆகிய சேர்மப்பொருளாகும். இது கிரேக்க மொழியிலிருந்து வந்த சொல்லாகும்; அஃதாவது, பல சிறுகூறுகள் (units) அடங்கிய பெரிய மூலக்கூறுகளைக் கொண்டதாகும். தற்போது பாலிமர்கள் பொறியியல், மருத்துவம் ஆகிய துறைகளில் முக்கியப் பங்கு வகிக்கின்றன. பாலிமர்வகைப் பொருள்கள் கூறுகளின் தொடரிணைப்பு (polymerization) என்னும் முறையில் உருவாக்கப்படுகின்றன. பாலிமர்கள் நெகிழ்வுப் பொருள்கள் (plastics), இலாஸ்டோமர்கள் (elastomers), இழைகள் (fibers) எனப் பல்வகைப்படும். இரப்பர் மீட்சித்தன்மையுடைய இலாஸ்டோமராகும். அதேபோல் நைலான், டெரிலின் போன்றவை இழைவகை பாலிமர்களாகும். ஒரு பாலிமரை வெப்பப்படுத்தும்போது, அது கண்ணாடித்தன்மை (glassy), தோல் தன்மை (leathery),

இரப்பர்த் தன்மை (rubbery), பாய்மஇரப்பர்த்தன்மை (viscous rubbery), திரவம் போன்ற ஐந்து நிலைகளைக் கடக்கிறது. பாலிமர்கள் அதிக வலிமையும், அதிக மீட்சிக்குணகத்தையும் கொண்டன. அவை காந்தப் பொருள்கள் அல்ல. பொதுவாய் அவை மின்கடத்தாப் பொருள்களாகும். ஏனெனில், அவை எளிதாய் முனைவாக்கம் அடையும். மேலும், அவற்றிலுள்ள சக பிணைப்பு மின்கடத்தலைச் சுழியாக்கி விடுகிறது. அவற்றிற்கு அதிக மின்காப்புத்தடையும், மிகக்குறைந்த வெப்பவிரிவும், மிகக்குறைந்த வெப்ப, மின்கடத்துந்திறனும் உள்ளன. தற்போது கடத்தும் பாலிமர்கள் (conducting polymers) பிரபலமாகிக் கொண்டுவருகின்றன. இவற்றில் சிறந்த வெப்பக்கடத்துந்திறனும் குறைகடத்திக்கு ஒப்பான மின் கடத்துந்திறனும் உள்ளன. குறைந்த மூலக்கூறு எடையுள்ள பாலிமர்கள் மென்மையாயும், அதிக மூலக்கூறு எடையுள்ளபாலிமர்கள் கடினத்தன்மை, வெப்பத்தடை மிகுதியாயும் உள்ளவையாகத் திகழ்கின்றன.

(i) ***நெகிழ்வுப்பொருள்கள்*** (Plastics):

அட்டவணை 11.1

வெப்ப உறைநெகிழ்வுப்பொருள்கள் (Thermosetting plastics)	வெப்ப நெகிழ்வுப்பொருள்கள் (Thermoplastics)
1. இவை அழுத்தம் கொடுத்து வெப்பத்தினால் குறிப்பிட்ட படிவாய் அமைக்கப்படுகின்றன. மேலும் வெப்பப் படுத்தினால் வேதியியல் மாற்றம் அடைந்து, கடின நிலையில் உறையும். அங்ஙனம் அடைந்துவிட்டால் மறுபடியும் அதனை வெப்பப்படுத்தி மென்மையாக்க முடியாது.	இவை அழுத்தம் கொடுத்தோ, கொடுக்காமலோ வெப்பத்தினால் மென்மைநிலை அடைகின்றன. எனினும், குறிப்பிட்ட வடிவாய் அமைக்கவும், கடினமாக்கவும் குளிர்வித்தல் அவசியம். இதனை மறுபடியும் வெப்பப்படுத்தி வேறுபல வடிவங்களையும் பெறலாம்.
2. இவை கடினமாயும், எவ்வகை விசைகளினாலும் திரிபடையா உறுதியாயும் உள்ளன.	இவை மென்மையாயும், குறைந்த உறுதி உடையவையாயும் உள்ளன.
3. இவை உயர் வெப்பநிலைகளில் பண்புகளை இழக்காமல் வேலைசெய்யும் திறமையுடையன.	உயர்வெப்பநிலைகளில் மிகவும் மென்மையடைந்துவிடுவதால், இவற்றை உயர்வெப்ப நிலைகளில் பயன்படுத்தமுடியாது.
எடுத்துக்காட்டுகள்	**எடுத்துக்காட்டுகள்**
அ) பேக்லைட்டுகள் (bakelites) ஆ) பாலிஸ்டர் (polyster)	அ) பாலிஎத்திலின் (polyethylene) ஆ) பாலிவினைல்குளோரைடு (PVC)
பயன்கள்	**பயன்கள்**
தொலைக்காட்சிப்பெட்டிகள், வானொலிப் பெட்டிகள் , தொலைபேசிகள் , மின்செருகிகள் (plugs) செய்ய பயன்படுகின்றன.	வீட்டிற்குப் பயன்படும் பொருள்களாய வாளிகள், தட்டுகள் செய்யவும், மின்கம்பிகளுக்கு உறையாகவும் பயன்படுகின்றன.

நெகிழ்வுப்பொருள்கள் பொதுவாய்க் கரிம அதிபாலிமர்கள் ஆகும். அவை இயற்கையிலேயேரெசின்கள் (resins), லேக் (lac), கெயிசன் (casein) போன்ற பொருள்களாய்க் கிடைக்கின்றன செயற்கைமுறையில் தயாரிக்கப்பட்ட பாலிஸ்ட்ரின் (polystyrene), பிவிசி எனப்படும் பாலிவினைல் குளோரைடு (polyvinyl chloride), பாலி அக்கிரிலிக் (polyacrylic) போன்றவைகளும் நெகிழ்வுப்பொருள்களாகும். நெகிழ்வுப்பொருள்கள் பொதுவாய் மிக்க அரிமானத் தடையையும் (corrosion resistance), மிகுந்த மின்கடத்தாத் திறனையும், நல்ல கடினத்தன்மையையும், குறைந்த வெப்பங்கடத்துந்திறனையும் கொண்டுள்ளன. நெகிழ்வுப்பொருள்களை இருவகையாகப் பிரிக்கலாம். அட்டவணை 11.1 இல் இருவகை நெகிழ்வுப் பொருள்களின் பண்புகளும், பயன்களும் கொடுக்கப்பட்டுள்ளன.

(ii) இலாஸ்டோமர்கள் (இரப்பர்கள்) :

இலாஸ்டோமர்கள் அதிக மீட்சித்தன்மையுடைய பாலிமர்களாகும். இவை மென்மையாயும், நெகிழ்வுத்தன்மை உடையனவாயும் திகழ்கின்றன. அதிக மின்கடத்தாத்தன்மை உடையன. இவற்றில் குறைந்த இறுதிவலிமை(ultimate tensile strength)யிருந்தாலும், கந்தகம் சேர்த்து வெப்பப்படுத்தி, கந்தகக்கூட்டு வலிமையேற்றல் (vulcanization) முறையில் வலிமையேற்றப்படுகின்றன. இயற்கையிலேயே இரப்பர் கேவியா பிராசிலியென்சிஸ் (Hevea Brasiliensis) என்னும் மரத்திலிருந்து கிடைக்கும் லெடெக்ஸ் (latex) என்னும் பால்போன்ற திரவத்தில் இருந்து கிடைக்கிறது. கந்தகம் சேர்க்கப்பட்ட இரப்பர் வெப்பத்தடை அதிகமாயுள்ளதென்றாகும். வீட்டு மின்பகிர்வு வழிகளில் பயன்படுத்தப்படும் மின்கம்பிகளுக்கு அது காப்பானாய்ச் செயல்படுகிறது.

(iii) மரப்பலகை (wood) :

மரப்பலகை இயற்கையிலேயே கிடைக்கும் ஒரு பாலிமராகும். இதில் படிக நிலை செல்லுலோஸ் சங்கிலிகள் உள்ளன. அச்சங்கிலிகள் படிக உருவமற்ற லிக்னைன் (lignin)களோடு இணைந்துள்ளன. இதில் நார் அல்லது இழை போன்ற கட்டமைப்பினைக் காணலாம். அதனால், இழையின் அச்சிற்கு இணையாய் மிக்க வலிமையையும், அச்சுச் செங்குத்துத் திசையில் குறைந்த வலிமையையும் கொண்டுள்ளன. ஒரு பாலிமரையும், மரப்பலகையையும் சேர்த்து உருவாக்கப்படும் பிளைவுட் (plywood) சிறந்த வலிமையைக் கொண்டது. அது குறைந்த விலையில் நிறைந்த பயன்களைத் தருவதாயுள்ளது.

(iv) கல்நார் (asbestos) :

கல்நார், இயற்கையிலேயே கிடைக்கும் இழையமைப்புடைய கனிமப் பொருளாகும். கல்நார் மின் எந்திரங்களில் பெருமளவு பயன்படுத்தப்படுகிறது. ஏனெனில், அதனால் 400°C – வரை நிலைப்பாடுடன் இருக்க முடியும். இஃது உயர்ந்த வெப்பநிலைகளில் மின்கம்பி, மின்வடங்களில் காப்பானாகவும், குறைந்த மின்னழுத்த வேலைகளில் கயிறு, நாடா, துணி, அட்டை போன்ற பல வடிவங்களில் காப்பானாகவும் பயன்படுத்தப்படுகிறது. மேலும், மின்வெப்பக் கருவிகளிலும் மின்கம்பிக்கு உறையாய்ப் பயன்படுகிறது. இதிலுள்ள முக்கியக் குறைபாடு அதிக மின்னாற்றல் இழப்பாகும்.

ஆ. திரவ மின்காப்புப் பொருள்கள் :

நெய்வணம் (varnish), மின்மாற்றி எண்ணெய் (transformer oil), வட எண்ணெய் (cable oil), பாகு நிலை வாசிலைன், சிலிகோன் எண்ணெய், புளூரோ கரிம எண்ணெய்கள் ஆகியவை முக்கியத் திரவ மின்காப்புப் பொருள்களாகும். திரவ மின்காப்பான்களை மூன்று வகைகளாய்ப் பிரிக்கலாம்.

i) கனிம மின்காப்பு எண்ணெய்கள் : மின்மாற்றி எண்ணெய், மின்வட எண்ணெய், மின்தேக்கி எண்ணெய் ஆகியவை இதில் அடங்கும்.

ii) செயற்கை மின்காப்பு எண்ணெய்கள் : அஸ்கரில்கள் (askarels), அரோகுலோர்கள் (aroclors), சோவொல் (sovol), சோவ்டோல் (sovtol) ஆகியவை முக்கியச் செயற்கை மின்காப்பு எண்ணெய்களாகும்.

iii) மற்ற மின்காப்பு எண்ணெய்கள் : தாவர எண்ணெய்கள், வாசிலைன், சிலிகோன் திரவங்கள் ஆகியவை இதில் அடங்கும்.

பொதுவாய்த் திரவக் காப்பான்கள் திண்மப் பொருள்களைவிட மின்காப்பு வலிமை குறைந்திருந்தபோதிலும் இவை வெப்பத்தை உடனுக்குடன் வெளியேற்றி மின்கருவிகளைக் குளிர்ப்படுத்தும் ; மேலும், செயல்படுநிலையில் வாயுக்கள் ஏதாவது தோன்றினாலும் திண்ம காப்பான்கள் போலில்லாது உடனே அதனை நீக்கிச் சீர்குலைவைத் தடுக்கிறது. மேலும், மின்முறிப்பி (circuit breaker)களில் ஏற்படும் சுடரை (arc) அணைக்கவும் பயன்படுகிறது.

கனிம மின்காப்பு எண்ணெய்கள் :

இதில் முக்கியமானது மின்மாற்றி எண்ணெய் ஆகும். இது மின்மாற்றிகளில் மின்காப்பியாய்ப் பயன்படுகிறது. மின்மாற்றியின் வாழ்வு இதன் மின்காப்பு வலிமையைச் சார்ந்துள்ளது. இது மின்மாற்றியின் சுற்றுகளில் உள்ள மின்காப்பினை நிலைப்படுத்துகிறது. மேலும், சுற்றுகளிலும், உள்ளகத்திலும் உண்டாகும் வெப்பத்தை வெளியேற்றிக் குளிர்ப்படுத்துகிறது. பெரும்பாலும் மின்மாற்றி எண்ணெய் அதிக மின்காப்பு வலிமை உடையது. நல்ல வெப்பங் கடத்தியாயும், வேதியியல் நிலைப்பாடு உள்ளதாயும் உள்ளது. பெரும்பாலும் கனிம எண்ணெய்கள், பண்படா (crude) பெட்ரோலியத்திலிருந்து தயாரிக்கப்படுகின்றன. இவற்றின் மின் பண்புகளும், வெப்பப் பண்புகளும், இதில் கலந்துள்ள ஆக்ஸிஜன், கந்தகம், நைட்ரஜன், இரும்பு, தாமிரம், அலுமினியம், சோடியம் ஆகியவற்றால்பாதிக்கப்படுகின்றன.

செயற்கை மின்காப்பு எண்ணெய்கள் :

இவற்றை கனிம எண்ணெய்களுடன் ஒப்பிடும்போது இவற்றின் குணச்சிறப்புகள் தாழ்ந்தே உள்ளன. ஆனால், இவற்றை மிகக் குறைவான விலையில் வாங்கலாம். மேலும், எளிதில் தீப்பிடியா. மிக்க வாழ்வுக்காலம் கொண்டது. அதனால் இவை மின்காப்பானாயும், குளிர்ப்பானாகவும் அதிமின்னழுத்த மின்மாற்றிகளில் பயன்படுகின்றன. குறிப்பாய்

அஸ்கரில் 100°C வரை நிலையாயிருக்கும். இது குளோரின் செலுத்தப்பட்ட ஹைடிரோ கார்பன்களில் இருந்து தயாரிக்கப்படுகிறது.

மற்ற மின்காப்பு எண்ணெய்கள் :

மற்ற மின்காப்பு எண்ணெய்களில் மிக முக்கியமானது சிலிக்கோன் திரவமாகும். இது 200°C – வரை நிலைப்பாட்டுடன் இருக்கும். ஆனால் இதன் விலை மிக அதிகம். இஃது ஒருசிலிக்கோன் கரிமக் கூட்டுப் பொருளாகும். இது மிக்கதிறன் வாய்ந்த மின்மாற்றிகளில் பயன்படுகிறது. மேலும் பீங்கான் காப்பான்களில் புறப்பரப்பு மின் எதிர்ப்புத் திறனை மிகுவிக்கவும் பயன்படுகிறது. இது 200°C – வரை உலோகங்களுடன் வேதியியல் வினைபுரியாது.

அடுத்து முக்கியமானது வாஸ்லைன் ஆகும். இது மிக உயர்ந்த பாகுநிலை உடையது. இது மின்தேக்கிகளில் மின்கடத்தாப் பொருளாய்ப் பயன்படுகிறது. தாளின்மேல் இது தடவப்பட்டு தாளின் மின்கடத்தாப்பொருள் வலிமை மிகுவிக்கப்படுகிறது.

இ. வாயுநிலை மின்காப்புப் பொருள்கள் :

வாயுநிலை மின்காப்புப் பொருள்களில் முக்கியமானவை காற்று, ஹைடிரஜன், நைட்ரஜன், கந்தக ஹெக்ஸாபுளூரைடு (sulphur hexa flouride) ஆகும்.

காற்று, இணைப்பிகளிலும், செருகிகளிலும், மின்தேக்கிகளிலும் மின்காப்புப் பொருளாய்ப் பயன்படுகிறது. மேலும், தலைக்குமேல் (overhead) செல்லும் மின்கடத்தும் கம்பிகளிலும் இது காப்பானாகப் பயன்படுகிறது. இதனைக் குறைந்த மின்னழுத்த வேலைகளில்மட்டும் பயன்படுத்தலாம். மேலும், இதில் மின்னாற்றல் இழப்புச் சுழியாயிருக்கும். நைட்ரஜன் பெரும்பாலும் மின் கருவிகளில் காப்பானாய்ப் பயன்படுகிறது. இது வேதியியல் மாற்றம் அடையாது மந்தமாயிருக்கும். இது மின்தேக்கிகளிலும், வடங்களிலும் மின்காப்புப் பொருளாய் அழுத்தத்துடன் நிரப்பப்படுகிறது. மேலும், இஃது எண்ணெய் நிரப்பப்பட்ட மின் மாற்றிகளில் ஆக்ஸிஜனேற்ற (oxidation) சூழ்நிலையைத் தவிர்க்கப் பயன்படுகிறது. கந்தக ஹெக்ஸாபுளூரைடு மின்மாற்றிகள், வேன்டிகிராப் மின்னியற்றி (Van de graff generator), இணைப்பிகள், மின்னழுத்த நிலைப்படுத்தி (voltage stablizer), எக்ஸ்ரே கருவி ஆகியவற்றில் காப்பானாகப் பயன்படுகிறது. சில மந்தவாயுக்கள் வெற்றிட எலெக்ட்ரான் குழாய்கள், மின்னிறக்கக் குழாய்கள் (discharge tubes) ஆகியவற்றில் காப்பான்களாய்ப்பயன்படுகின்றன.

மாதிரிக்கணக்குகள் :

1. 4.5 மில்லிமீட்டர் தடிமனுள்ள ஒருபேக்லைட் தகட்டின் மின்கடத்தாப் பொருள் மாறிலி படம்|11.14இல்காண்பிக்கப்பட்டுள்ள ஷெர்ரிங் சமனச் சுற்றுமூலம் கண்டுபிடிக்கப்படுகிறது. சமனச்சுற்று 50 ஹெர்ட்ஸ் அதிர்வெண்ணுள்ள மாறுதிசைமின்னழுத்த மூலத்தைப் பயன்படுத்துகிறது. மேலும் மின்தேக்குத்திறன் கண்டுபிடிக்க வேண்டிய மின்தேக்கி C_1 இன் இணைத்தகடுகள் 0.06 மீட்டர் ஆரமுள்ள சமஅளவுள்ள வட்ட வடிவமாயுள்ளன. அதனுள் கொடுக்கப்பட்ட

பேக்லைட் தகடு செருகப்பட்டுள்ளது. நிலைத்தரம் வாய்ந்த மின்தேக்கி C_2 இன் மதிப்பு 106 பைக்கோ பாரடு ஆகும். மின்தூண்டலில்லாத நிலைத்தரம் மிக்க மின்தடை R_4 இன் மதிப்பு $1000/\pi$ ஓம் ஆகும். பகுப்பானில் மின்னோட்டம் சுழியாயிருக்கும்போது மாறுமின்தேக்கி C_4 இன் மதிப்பு $= 0.5$ மைக்ரோபாரடு, மாறுமின்தடை R_3 இன் மதிப்பு $= 260$ ஓம் ஆனால், கொடுக்கப்பட்ட பேக்லைட்டின் ஒப்புமை மின்மறுப்புத்திறனையும், மின்திறன் காரணியையும் கணக்கிடுக.

$$r_1 = \frac{C_4}{C_2} \cdot R_3 = \frac{0.5 \times 10^{-6}}{106 \times 10^{-12}} \times 260 = 1.23 \times 10^6 \text{ ஓம்.}$$

பேக்லைட் செருகப்பட்ட மின்தேக்கியின் மின்தேக்குதிறன்,

$$C_1 = \frac{R_4}{R_3} C_2 = \frac{1000}{\pi \times 260} \times 106 \times 10^{-12} = 130 \text{ பைக்கோபாரடு.}$$

திறன் காரணி, $\tan \delta = \omega C_1 r_1 = 2\pi \times 50 \times 130 \times 10^{-12} \times 1.23 \times 10^6 = 0.05$

$C_1 = \varepsilon_r \varepsilon_o \dfrac{A}{d}$ எனில், பேக்லைட்டின் ஒப்புமை மின்மறுப்புத்திறன்,

$$\varepsilon_r = \frac{C_1 d}{\varepsilon_o A} = \frac{130 \times 10^{-12} \times 4.5 \times 10^{-3}}{8.854 \times 10^{-12} \times \pi (0.06)^2} = 5.9.$$

2. ஆர்கான் வாயுவினுள் நிலைமின்புலம் 10^6 வோல்ட்/மீ என்னும் அளவில் செலுத்தப்படுகிறது ஆர்கான் அணுவின் ஆரம் ஏறத்தாழ 10^{-10} மீட்டர்; அவ்வணுக் கருவிற்கும், எலெக்ட்ரான் திரள் மையத்திற்கும் இடையே மின்புலத்தால் ஏற்படும் பெயர்ச்சியையும் எலெக்ட்ரானிய முனைவாக்கத்திறனையும் கணக்கிடுக.

$$\text{இடப்பெயர்ச்சி } x = \frac{4 \pi \varepsilon_o R^3 E}{Z e}$$

$$= \frac{4\pi \times 8.854 \times 10^{-12} \times 10^{-30} \times 10^6}{18 \times 1.6 \times 10^{-19}}$$

$$\approx 4 \times 10^{-17} \text{ மீட்டர்}$$

எலெக்ட்ரானிய முனைவாக்கத் திறன் 'α_e' $= 4 \pi \varepsilon_o R^3 = 4\pi \times 8.854 \times 10^{-12} \times 10^{-30}$

$$= 1.113 \times 10^{-40} \text{ பாரடு} - \text{மீ}^2$$

3. ஹைடிரோகுளோரிக் வாயுவிற்கு மின் இருமுனைவுத்திருப்புத்திறன் 1.04 டிபை அலகுகள் ஆகும். 27° சென்டிகிரேடில் அதன் திசைமுகமாக்கு முனைவாக்கத் திறனைக் கண்டுபிடி. மேலும், அதிலுள்ள மொத்த இருமுனைவுகளின் எண்ணிக்கை 10^{27} மீ$^{-3}$ ஆகவும், செலுத்தப்படும் மின்புலம் 10^6 வோல்ட்/மீட்டர் ஆகவும் இருந்தால் அதில் ஏற்படும் மொத்தத் திசைமுகமாக்கு முனைவாக்கத்திறனையும் கணக்கிடுக. 1 டிபை அலகு $= 3.33 \times 10^{-30}$ கூலம் மீட்டர்

$$\alpha_o = \frac{\mu^2}{3kT} = \frac{(1.04 \times 3.33 \times 10^{-30})^2}{3. \times 1.38 \times 10^{-23} \times 300} = 0.98 \times 10^{-39} \text{ பாரடு-மீ}^2$$

$$P_o = N\,\alpha_o\,E = 10^{27} \times 0.98 \times 10^{-39} \times 10^6$$

$$= 0.98 \times 10^{-6} \text{ கூலம் மீ}^{-2}$$

4. ஜெர்மேனியத்தின் எலெக்ட்ரானிய முனைவாக்கத்திறனைக் கண்டுபிடி. அதன் ஒப்புமைமின்மறுப்புத்திறன் மதிப்பு 16; (கிளாஷியஸ் மொசாட்டித் தொடர்பினைப் பயன்படுத்தி எலெக்ட்ரானிய முனைவாக்கத்திறனைக் கண்டுபிடிக்கலாம்)

கிளாஷியஸ் – மொசாட்டித்தொடர்பு,

$$\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} = \frac{N\,\alpha_e}{3\,\varepsilon_o}$$

ஓரலகு பருமனுள்ள ஜெர்மேனியத்திலுள்ள மொத்த அணுக்கள்

$$N = \frac{\text{அவகட்ரோ எண்} \times \text{ஜெர்மேனியத்தின் அடர்த்தி}}{\text{ஜெர்மேனியத்தின் அணு எடை}}$$

$$= \frac{6.025 \times 10^{26} \times 5400}{72.6} = 4.45 \times 10^{28} \text{ மீ}^{-3}$$

$$\frac{16 - 1}{16 + 2} = \frac{4.45 \times 10^{28} \times \alpha_e}{3 \times 8.854 \times 10^{-12}}$$

$$\therefore\ \alpha_e = 4.96 \times 10^{-40} \text{ பாரடு} - \text{மீ}^2$$

சுருக்கம்

1. மின்கடத்தாப் பொருள்கள் தம்முள் மின்னோட்டம் பாய அனுமதிப்பது இல்லை. அப்பொருள்களின் மின்கடத்தாமைக் குணத்தை அவற்றின் மின் கடத்தாப் பொருள் மாறிலி தீர்மானிக்கிறது.

2. மின்புலத்தால் மின்இருமுனைவுகள் தோன்றுவதை முனைவாக்கம் என்கிறோம். மின்முனைவாக்கம் மின்கடத்தாப் பொருள்களில் பல வழிகளில் ஏற்படுகின்றன. சில முனைவாக்கங்கள் வெப்பநிலையைச் சார்ந்தும், சில வெப்பநிலையைச் சாராமலும் இருக்கின்றன.

3. மாறுமின்புலத்தில் முனைவாக்கம் ஏற்படும்போது மின்னாற்றல் இழப்பு உண்டாகிறது. மின்னாற்றல் இழப்பு மாறுமின்புலத்தின் அதிர்வெண்ணைச் சார்ந்துள்ளது.

4. அணு அல்லது மூலக்கூறுகாணும் உட்புலம், பேரளவுள்ள வெளிமின்புலத்தைவிட மிகுதியாயுள்ளது.

5. கிளாஷியஸ் மொசாட்டித் தொடர்பின்மூலம் பொருள்களின் ஒப்புமை மின்மறுப்புத்திறனைக் கணக்கிடலாம்.

6. ஃபெரோ மின்பொருள்கள் இரும்பியல் காந்தப் பொருள்களைப்போல் தேக்க விளைவு உடையதாயுள்ளன. அதனால், இப்பொருள்களில் தன்னியல் முனைவாக்கம் நடைபெறுகிறது.

7. பீசோ மின்பொருள்கள் எந்திர ஆற்றலை மின்ஆற்றலாகவோ, மின்ஆற்றலை எந்திர ஆற்றலாகவோ மாற்றும் ஆற்றல் மாற்றிகளாய்ச் செயல்படுகின்றன. இவை மீயொலிகளை உருவாக்கப்பயன்படுகின்றன.

8. பீசோ மின்விளைவு மையச் சமச்சீரற்ற அணிக்கோவை உள்ள பொருள்களில் மட்டும் ஏற்படுகிறது. ஏனெனில், அவைகளில் எந்திர விசைகள் செயல்படும்போது பொருளின் மின்இருமுனைவுத்திருப்புத்திறன்களின் தொகுபயன் சுழியில்லாமல் இருக்கிறது.

9. மின்கடத்தாப் பொருள்களில் பெரும்பாலும் சீர்குலைவு மின்புலத்தாலும் வெப்பத்தாலும் ஏற்படுகின்றது. சீர்குலைவின்போது பொருளின்கண் மின்னோட்டம் மிகுதியாய்ப் பாயும்.

10. மின்காப்புப் பொருள்களைத் திண்ம, திரவ, வாயு மின்காப்புபொருள்கள் என வகைப்படுத்தலாம். அவற்றின் பண்புகள் மின்காப்புத் தடை, மின்கடத்தாப்பொருள் வலிமை, மின்கடத்தாப் பொருள்மாறிலி, மின்னாற்றல் இழப்பு ஆகியவற்றால் வரையறுக்கப்படுகின்றன.

வினாக்கள்

1. ஒருமின்கடத்தாப் பொருளில் ஏற்படும் பல்வகை முனைவாக்க முறைகளை விளக்கமாய்க்கூறி மின்புல அதிர்வெண்களோடு அவை எவ்விதம் சார்ந்துள்ளன என்பதனைப் படம்வரைந்து காட்டு.

2. மின்கடத்தாப் பொருளில் முனைவறாக்கம் என்பது என்ன? ஒரு திசைசாராப் பண்பியலான திண்மப் பொருளில் மின்கடத்தாப் பொருள் மாறிலிக்கும், முனைவாக்கத் திறனுக்கும் உள்ள தொடர்பினைத் தருவி.

3. மின்கடத்தாப் பொருளில் உட்புலம் என்றால் என்ன? ஒருகனசதுர இயலமைப்பு உடைய பொருளுக்கு அதனைக் கணக்கிடுக. அதன் மூலம் கிளாஷியஸ் மொசாட்டித் தொடர்பினைத் தருவித்து அஃது எங்ஙனம் திண்மப் பொருள்களின் மின்கடத்தாப் பொருள் மாறிலியின் மதிப்பினைத் தருகிறது என்பதனையும் விளக்கவும்.

4. அ) முனைவுப் பொருள்கள், முனைவு இல்லாப் பொருள்கள் ஆகியவற்றை எங்ஙனம் வேறுபடுத்திக் காட்டுவாய்?

   ஆ) ஒருமுனைவுப் பொருளின் மொத்த முனைவாக்கத் திறனைக் காண்பிக்கும் சமன்பாட்டை எழுதுக.

   இ) ஒரு மாறுமின்புலத்தில் முனைவுப்பொருள் எங்ஙனம் செயல்படும் என்பதை விவரி.

   ஈ) இருமுனைவு தளர்நேரம், இழப்புக் கோணம் ஆகியவற்றை விளக்குக.

5. பேரியம் டைடனேட் எங்ஙனம் ஃபெரோ மின் பொருளாய்ச் செயல்படுகிறது என்பதனை விளக்கு. ஃபெரோமின் பொருள்களின் பயன்கள் யாவை?

6. பீசோ மின் விளைவு என்றால் என்ன? பீசோ மின்படிகங்களின் பயன்களை நன்கு விவரி.

7. மின்கடத்தாப் பொருளின் சீர்குலைவு என்றால் என்ன? மின்கடத்தாப் பொருள்களில் ஏற்படும் சீர்குலைவுகள் பற்றி விளக்குக.

8. மின்காப்புப் பொருளின் வேலை என்ன? மின் துறையில் பயன்படும் பலவகை மின்காப்புப் பொருள்களையும் அவற்றின் குணங்களையும் விரிவாய் எழுதுக.

9. ஒருபொருளின் மின்கடத்தாப்பொருள் மாறிலியைக் கண்டுபிடிக்க உதவும் ஒரு சோதனையை நன்கு விளக்குக.

10. சிறுகுறிப்பு வரைக.

அ. மின்கடத்தாப் பொருள்மாறிலி.

ஆ. ஃபெரோ மின்தேக்கவிளைவுக் கண்ணி.

இ. தன்னியல் முனைவாக்கம்.

ஈ. மின்மாற்றி எண்ணெய்.

மேற்கோள் நூற்பட்டியல்:

1. 'Properties of Electrical Engineering Materials' – G.C. Jain, Harper and Row, New York, 1967.
2. 'Electronic Processes in Materials' – L.V. Azaroff and J.J. Brophy, Mc Graw Hill, 1963.
3. 'A Course in Electrical Engineering Materials' – S.P. Seth and P.V. Gupta, Dhanpat Rai and Sons, Delhi, 1981.
4. 'Principles and Applications of Ferroelectrics and Related Materials' – M.E. Lines and A.E. Glass, Oxford University Press, London, 1977.

12. பொருள்களின் ஒளிப்பண்புகள்

12.1 அறிமுகம்

குறைகடத்திகளில் $P-N$ சந்தியில் ஒளியினால் ஏற்படும் விளைவுகள்பற்றிச் சிறிது கண்டோம். இந்த அத்தியாயத்தில் கடத்திகள், குறைகடத்திகள், மின் கடத்தாப் பொருள்கள் ஆகியவற்றில் ஒளி படுவதால் ஏற்படும் விளைவுகள்பற்றிக் காண்போம். ஒரு பொருள் நிறமுள்ளதாய்த் தோன்றுதற்கு அதன் ஒளிக்குணங்களே காரணமாகும். சில பொருள்கள் ஒளியினை உட்கவருகின்றன. சில பொருள்கள் ஒளியினை வெளிவிடுகின்றன. மேலும், லேசர் போன்ற கருவிகளில் செறிவு மிகுந்த ஓரியல் ஒளி (coherent light) கிடைக்கிறது. அதனால், இவற்றைப் பற்றிச் சற்று விரிவாய் நாம் தெரிந்துகொள்வது மிக முக்கியமானதொன்றாகும்.

12.2 ஒளிர்தலும் (fluorescence), நின்றொளிர்தலும் (phosphorescence)

சில பொருள்கள் ஏதேனும் ஆற்றலை உட்கொண்டபின் உட்கொள்ளப்பட்ட ஆற்றலைக் கண்ணுறு ஒளியாய் உமிழும். இதனையே **ஒளிவிடுதல்** (luminescence) என்று கூறுகிறோம். உட்கொள்ளப்படும் ஆற்றல் பல வடிவங்களில் உள்ளது. அது வெப்பம், ஒளி, எலெக்ட்ரான்கள் துகள்களுடன் கொள்ளும் மோதல், வேதியியல் மாற்றம் ஆகியவற்றின்மூலம் வரலாம். ஆற்றல் உட்கொள்ளப்பட்டவுடன் உமிழ்தல் ஏறத்தாழ 10^{-7} செகண்டுக்குள் நடந்தால் இந்த ஒளிவிடும் நிகழ்ச்சியை **ஒளிர்தல்**(fluorescence) என்கிறோம். எக்ஸ்கதிர் சில பசைகளின்மீது விழும்போது கண்ணுறு ஒளியாய் ஒளிர்வது இவ்விளைவினால் ஆகும். பொதுவாய் ஒளிர்தல் நிகழ்ச்சிமூலம் குறைந்த அலைநீளமுள்ள ஆற்றலை உயர்ந்த அலைநீளமுள்ள ஆற்றலாய் மாற்றலாம். உட்கொள்ளப்படும் ஆற்றல், நிறுத்தப்பட்டால் ஒளிர்தலும் உடனே நின்றுவிடும். ஒருபொருளின் ஆற்றல் உட்கொள்ளப்பட்ட நேரத்திலிருந்து கண்ணுறு ஒளி அதிலிருந்து உமிழ எடுத்துக்கொள்ளும் நேரம் 10^{-7} செகண்டுக்குமேல் இருந்தால் அந்நிகழ்ச்சியை **நின்றொளிர்தல்**(phosphorescence) என்பர். உட்கொள்ளப்படும் ஆற்றல் நிறுத்தப்பட்டாற்கூட பல நிமிடங்களுக்கு இந்த நின்றொளிர்தல் நடைபெற்றுக் கொண்டிருக்கும். இத்தகைய முறைகளில் கிளர்ச்சி உண்டாக்கும் போட்டானின் ஆற்றல் பொருளிலிருந்து வரும் கண்ணுறு ஒளி போட்டானின் ஆற்றலைவிட அதிகமாயிருக்கும்.

கண்ணுறு ஒளி உமிழ்தல் நிகழ்ச்சி சிறப்பாய் நடைபெறப்பொருளின் ஆற்றல் இடைவெளியில் சில வேற்றுப்பொருள் அணுக்கள் கொண்டு தகுந்த ஆற்றல் மட்டங்கள் தோற்றுவிக்கப்படும். அவ்வித வேற்றுப்பொருள்களைச் செயலுடைப் பொருள்கள் (activators) மற்றும் இணைச்செயலுடைப் பொருள்கள் (coactivators) என்பர். சான்றாய்த் துத்தநாக சல்பைடு பாஸ்பரில் (Zinc sulphide phosphor) தாமிரம் செயலுடை பொருளாகும். குளோரின் இணை செயலுடைப் பொருளாகும். செயலுடைப் பொருள்களின் ஆற்றல் மட்டங்கள் இணைதிறப் பட்டைக்கு அருகிலும், இணைசெயலுடைப் பொருள்களின் ஆற்றல் மட்டங்கள் கடத்துப் பட்டைக்கு அருகிலும்

உள்ளன. செயலுடைப் பொருள், இடைஆற்றல் மட்டங்களைத் தோற்றுவித்து அவற்றில் எலெக்ட்ரான்கள் விழ வழிசெய்கின்றன. இணை செயலுடைப் பொருள் ஒருகண்ணி (trap) மாதிரி செயல்பட்டு எலெக்ட்ரான்களைப் பிடித்து வைத்துக்கொண்டு உட்கவருதற்கும், வெளியிடுதலுக்கும் இடையே உள்ள தாழ்த்து நேரத்தை (delay time)க் கட்டுப்படுத்துகிறது. எதிர்முனைக்கதிர் அலை பதிப்பி (CRO), தொலைக்காட்சிப் பெட்டி ஆகியவற்றிலுள்ள திரைகளில் ஒளிரும் பொருள்கள் தடவப்பட்டுள்ளதால் சைகைகளைத்தாங்கியுள்ள எலெக்ட்ரான் கதிரின் இயக்கத்தை நாம் கண்ணுறு ஒளிக்கதிராய்ப் பார்க்கலாம். மேலும் வீடுகள், அலுவலகங்களில் உள்ள ஒளிரும் விளக்குகள் (fluorescent lamps) எனப்படும் குழல் விளக்குகளின் உட்பக்கத்தில் ஒளிரும் பொருள்களின் பூச்சுக் கொடுக்கப்பட்டிருக்கும். அதனால், அப்பூச்சு ஒளிர்தல்மூலம் பாதரச மின்னிறக்கத்தில் வரும் பெரும்பான்மையான புற ஊதாக்கதிர்களை உட்கவர்ந்து அவற்றை நமக்குக் கண்ணுறு ஒளிக்கதிர்களாய்த் தருகிறது. புற ஊதாக்கதிர்கள் நமக்கு இடர்விளைவிப்பவை ஆகும். அந்த இடரிலிருந்து நம்மைக் காப்பவை ஒளிரும் பொருள்கள் ஆகும். மேலும், கால்சியம் பாஸ்பேட், பேரியம் பிளாட்டினோ சயனைடு ஆகிய பொருள்களில் சிறிதளவு வெள்ளி மற்றும் மாங்கனிஸ் ஆகியவற்றின் உப்புக்களைச் சேர்த்து ஒளிரும் பொருள்களான பாஸ்பர்கள் (phosphors) தயாரிக்கப்படுகின்றன.

12.3 *நிறமையங்கள்* (colour centres)

கண்ணுறு ஒளிப்பகுதியில் ஆற்றல் உட்கவரப்படுதலால் பொருள்கள் பல்வேறு நிறங்களைப் பெற்றிருக்கின்றன. மின்கடத்தாப் பொருள்களில் மிகுதியாய் ஆற்றல் இடைவெளியிருப்பதால் அவை ஒளிபுகு பொருள்களாய் விளங்கினாலும் கூடச் சில நேரங்களில் நிறமுடைப்பொருள்களாய்த் தோன்றும். படிகத்திலுள்ள குறைபாடுகள் கண்ணுறு ஒளிப்பகுதியில் ஒருகுறிப்பிட்ட அலைநீளமுள்ள ஒளியை உட்கவருவதால் அப்படிகத்திற்கு நிறம் உண்டாகிறது. இப்படிகக் குறைபாடுகளை நிறமையங்கள் அல்லது F மையங்கள் என்பர். 'பார்பு (Farbe)' எனும் ஜெர்மன் சொல் நிறத்தைக் குறிப்பதால் இவை F மையங்களெனப் பெயர் பெற்றன. உதாரணமாகச் சோடியம் குளோரைடு படிகமானது கண்ணுறு ஒளிப்பகுதியில் ஒளிபுகும் பொருளாய் அமைகிறது. அஃதாவது, சோடியம் குளோரைடு பல அதிர்வெண்கள் கொண்ட கண்ணுறு ஒளிப் பகுதியில் இருந்து ஆற்றல் எதனையும் உட்கவராமல் இருப்பதால் அது நிறமில்லாப் படிகமாய் விளங்குகிறது. எனினும் சோடியம் குளோரைடு படிகத்தை எக்ஸ்கதிர் வீச்சிற்கு உட்படுத்திய பின்னர்ப் பார்த்தால் அது மஞ்சள் பழுப்பு (Yellow-Brown) நிறத்தை உடையதாய் இருக்கும். இதன் காரணத்தைப் பின்வருமாறு விளக்கலாம். எக்ஸ் கதிர்வீச்சால் சோடியம் குளோரைடு அணிக்கோவையிலிருந்து சில கட்டுண்ட எலெக்ட்ரான்கள் கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்கள் நிலைக்கு ஆளாகி வேறு இடங்களுக்கு மாற்றப்படுகின்றன. அங்ஙனம் மாற்றப்பட்ட எலெக்ட்ரான்கள் சூரிய ஒளி நிறமாலையில் கண்ணுறு ஒளிப்பகுதியைச் சார்ந்த குறிப்பிட்ட அதிர்வெண் வரிசையோடு ஒத்திசைவு செய்து அந்த அதிர்வெண்களுக்கு உரிய ஆற்றல்களை உட்கவர்கின்றன. அதனால் வெள்ளைஒளி எக்ஸ்கதிர் வீசப்பட்ட இப்படிகத்தினூடே செல்கையில் அதிலொரு பகுதியோடு எலெக்ட்ரான் ஒத்திசைவு அடையும். அந்த அதிர்வெண் வரிசை உட்கவரப்படுவதால் நம் கண்ணுக்கு இப்படிகம்

மஞ்சளும் பழுப்பும் கலந்த நிறமாய்த் தெரியும். இத்தகைய உட்கவர்தலுக்குக் காரணமாய் அமையும் மையங்கள் '*F*' மையங்கள் ஆகும். இத்தகைய '*F*' மையங்கள் கார ஹாலைடுகளிலும் (alkali halides), மற்ற அயனிப்படிகங்களிலும் உலோக அயனிகளை மிகுந்த அளவில் சேர்த்து உற்பத்தி செய்யப்படுகின்றன. இந்த நிறமையங்கள் தங்கள் ஆற்றல் மட்டங்களை ஆற்றல் இடைவெளியில் ஏற்படுத்திக் கொள்கின்றன.

12.4 தன்னியல் உமிழ்வும் (Spontaneous Emission), தூண்டு உமிழ்வும் (Stimulated Emission)

வெப்பச் சமநிலையிலுள்ள ஒருபொருளின்மீது மின்காந்தக் கதிர்வீச்சுப் படுமானால் ஒத்திசைவு உட்கவர்தல் (resonance absorption) ஏற்பட்டு ஆற்றல் உட்கவரப்படும். அதனால், அணுக்கள் அல்லது மூலக்கூறுகள் தரைமட்டத்திலிருந்து கிளர் ஆற்றல் மட்டங்களுக்கு (excited energy levels)ச் செல்கின்றன. எனினும், அவை தாம் உட்கொண்ட ஆற்றலை வெளியிட்டுச் சமநிலைக்கு வரமுயலும். கிளர் ஆற்றல் மட்டங்களிலிருந்து மீண்டும் தரைமட்டத்திற்கு அவை வரும்போது தன்னியல் உமிழ்வு, தூண்டு உமிழ்வு என்னும் இருமுறைகளில் உட்கவரப்பட்ட ஆற்றலை வெளியிடுகின்றன.

புறச்செயலிகளின் (external agents) ஆளுகைக்குஉட்படாமல் தன்னிச்சையாய் உயர்மட்டத்திலுள்ள அணுக்கள் அல்லது மூலக்கூறுகள் தாழ்மட்டத்திற்கு வருவதும், அவ்வாறு வரும்போது ஒருபோட்டானை வெளியிடுவதும் தன்னியல் உமிழ்வு எனப்படும். இது புள்ளியியல் நிகழ்ச்சியாகும் (statistical phenomenon). அஃதாவது, உயர்மட்டத்திலுள்ள அணு அல்லது மூலக்கூறு அங்கு எவ்வளவு காலம் இருக்குமென்பதனை நிச்சயமாய்ச் சொல்ல முடியாது. மேலும், குறிப்பிட்ட இடப்பெயர்வு (transition) எப்போது நடக்கப்போகிறது என்பதனையும் உறுதியாய்ச் சொல்லமுடியாது.

சில அணுக்கள் தரைமட்டத்திற்கு உடனே நேர்இடப்பெயர்வு மூலமாகவோ, பல்வேறு படிகளில் சிறு இடப்பெயர்வுகளின் மூலம் சற்று நேரம் கழித்தோ வரலாம். அதனால், கிளர்ச்சியடைந்த அணுக்கள் அல்லது மூலக்கூறுகள் உயர்மட்டத்தில் இருக்கும் நேரத்தின் சராசரி மதிப்பு ஒன்றனைக் கணக்கிடலாம். இச்சராசரி நேரம் தன்னியல் உமிழ்விற்குரிய வாழ்நாள் (life time) எனப்படும். பொதுவாய்த் தன்னிச்சையாய் வெளிவந்த கதிர்வீச்சில் பல அலைநீளங்கள் அல்லது அதிர்வெண்கள் இருக்கும். அதனால், அதனைப்பலநிறக் கதிர்வீச்சு (polychromatic radiation) என்பர். மேலும் அஃது ஓரியல் பண்பிலாக் கதிர்வீச்சு (incoherent radiation) ஆகும். சூரிய ஒளி, பாதரசக் குழல்விளக்குகளில் மின்னிறக்கத்தால் வரும் வெள்ளொளி ஆகியவை தன்னியல் கதிர்வீச்சிற்கு (spontaneous radiation) நல்ல உதாரணங்களாகும்.

கிளர்ச்சியுற்ற அணுக்களிலிருந்து தன்னியல் உமிழ்வு எப்போதும் நிகழ்ந்து கொண்டேயிருக்கும். தன்னியல் உமிழ்வின் மூலம் வெளிவரும் போட்டான்கள் ஓர் ஒழுங்குநிலை அற்றவை. ஆனால் தூண்டு உமிழ்வு தனிச் சிறப்புடையது. பொருளில் ஒருசில அணுக்கள் உயர்ஆற்றல் நிலையில் இருக்கக் கூடும். அவ்வாற்றல் நிலையில் ஆற்றல் மதிப்பு 'E' எனக்கொள்ளவோம். தரைநிலை ஆற்றல் 'E_0' எனக்கொள்வோம்.

இவ்விரு ஆற்றல் நிலைகளின் வேறுபாட்டுக்கு $(E-E_0)$ச் சமமான ஆற்றலை உடைய ஒரு போட்டான் பொருளினுள் செலுத்தப்பட்டால் தூண்டுதல் ஏற்படுகிறது. அப்போது உயர்ஆற்றல் நிலையிலுள்ள ஓர்அணு தரைநிலைக்குத் தாவி ஒரு போட்டானை வெளிவிடுகிறது. அப்போட்டானும், இந் நிகழ்ச்சியைத் தூண்டிய போட்டானும் ஒரே திசையிலும், சம கட்டத்திலும் செல்கின்றன. மேலும் அவையிரண்டின் அதிர்வெண்ணும் சமம். இதனையே நாம் தூண்டு உமிழ்வு என்கிறோம். அதனால் ஒரு போட்டானின் தூண்டுதல் மூலம் கிளர்ச்சியுற்ற அணு தாழ்நிலைக்கு வரும்போது அது வெளியிடுகின்ற போட்டானின் ஆற்றலும், தூண்டிய போட்டானின் ஆற்றலும் சமமாயிருப்பதால், இவ்விரு ஒத்த அதிர்வெண்களுடைய போட்டான்கள் ஒரே திசையில் மிக ஒழுங்குடன் செல்கின்றன. இந்நிகழ்ச்சியே தூண்டு உமிழ்வு ஆகும். மேலும், இந்நிகழ்ச்சியைத் தூண்டும் போட்டான் தன்னியல் உமிழ்வின்மூலம் வருகின்றது. தூண்டு உமிழ்விலிருந்து வரும் கதிர்வீச்சு ஓரியல் (coherent) பண்புடையதாயிருக்கும். மேலும், கதிர் வீச்சின் அதிர்வெண்கள் சமமாயிருப்பதால் கதிர்வீச்சு ஒற்றை நிறத்தன்மை (monochromatic) வாய்ந்தவையாயிருக்கும். ஓரியல் கதிர்வீச்சில் உள்ள அலைகள் தங்களுக்குள்ள கட்ட வேறுபாட்டை எப்போதும், எங்கும் ஒருமாறிலியாய் வைத்துக் கொள்கின்றன. மேலும், தூண்டு உமிழ்வில் குறிப்பிட்ட இடப்பெயர்வு எப்போது நடக்கும் என்பதனை உறுதியாய்ச் சொல்லலாம். லேசர்கதிர் தூண்டு கதிர்வீச்சிற்கு நல்லதோர் உதாரணமாகும்.

12.5 உலோகங்கள், மின்கடத்தாப் பொருள்கள், குறைகடத்திகள் ஆகியவைகளில் ஒளி உட்கவரப்படுதல்

((அ)) உலோகங்களில் ஒளி உட்கவரப்படுதல்

மின்காந்த நிறமாலையில் கண்ணுறு ஒளிப் பகுதி, 3600 Åலிருந்து 7400 Å வரை உள்ளது. ஃபெர்மி ஆற்றல் மட்டத்திற்கு அருகிலுள்ள கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்கள் சமநிலையில் படுஒளிக்கதிரை (incident light ray) உட்கொண்டு கிளர்ச்சியடைகின்றன. அதனால் ஃபெர்மி மட்டத்திற்கு மேலுள்ள ஆற்றல் நிலைகளுக்குச் செல்கின்றன; ஆனால், உடனே உட்கவர்ந்த ஒளி ஆற்றலை வெளியிட்டு சமநிலைக்கு வந்துவிடுகின்றன. அதனால், உலோகம் நல்லதோர் ஒளிபிரதிபலிப்பானாய்ச் செயல்படுகிறது. அதனுள் ஒளி உட்புகமுடியாது. ஆனால், இவ்வுண்மை குறைந்த அதிர்வெண்களிலிருந்து புற ஊதா அதிர்வெண் வரிசையின் மையம் வரைக்கும் பொருந்தும். புற ஊதா மையத்திலிருந்து உலோகங்கள் மின்காந்தஅலை புகும் ஊடகங்களாக மாறிவிடுகின்றன. குறிப்பாக எக்ஸ்கதிர்கள், காமாக்கதிர்கள் ஆகியவை உலோகத்திற்குள் உட்புகமுடியும். படுஒளி அலையின் அலைவு நேரம் (period) மிகுதியாயிருந்தால், அந்த நேரத்தில் எலெக்ட்ரான் நிறைய மோதல்களுக்கு உள்ளாகிறது. அதனால் தான் பெற்ற மிகுதியான ஆற்றலை இம்மோதல்களில் வெளியிட்டுவிடுகிறது. கிளர்ச்சியேற்றமும், அதற்கு ஏற்ற செயற்பாடும் (response) ஒரே கட்டத்தில் இருந்தால்தான் இங்ஙனம் வெளியிடப்படும் ஆற்றல் நூறு விழுக்காடுகளாயிருக்கும். ஆனால், பொதுவாய்க் கிளர்ச்சியேற்றமும் அதற்கேற்ற செயற்பாடும் கட்ட வேறுபாட்டில் இருக்கின்றன. அதனால் மின்காந்த நிறமாலையின் ஒருபகுதியில் உலோகங்களுக்கு எதிர்க்குறியுடைய மின்கடத்தாப்பொருள் மாறிலி

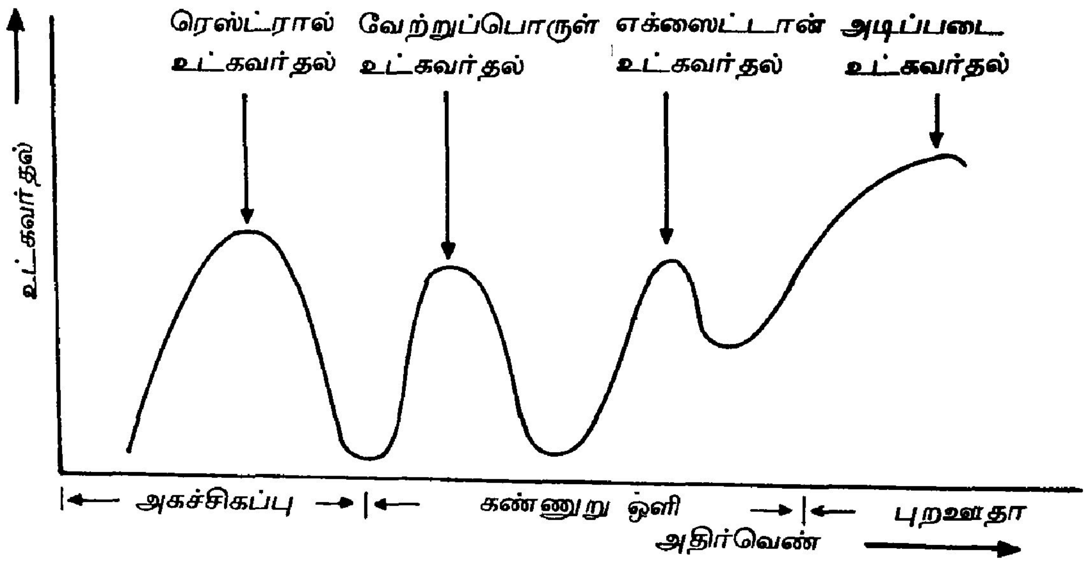
கிடைக்கிறது. எதிர்குறியுடைய மின்கடத்தாப் பொருள்மாறிலி, சிக்கல் (complex) ஒளிவிலகல் எண்ணைத் தருகிறது. அஃதாவது, படுஒளிக்கதிர் பிரதிபலிப்பதை எதிர்க்குறியுடைய மின்கடத்தாப் பொருள்மாறிலி காட்டுகிறது. பெரும்பான்மையான உலோகங்களுக்குச் சிக்கல் ஒளிவிலகல் எண் (complex refractive index) கண்ணுறு ஒளிப்பகுதியில் மட்டும் இருக்கும். பொதுவாக உலோகங்கள் நல்ல பிரதிபலிப்பான்களாகும்.

மேலும், உலோகங்களிலுள்ள எலெக்ட்ரான்கள் படுஒளிக்கதிர்களின் போட்டான்களை உட்கவர்ந்து, அவற்றின் இயக்க ஆற்றலை அதிகரித்துக் கொள்கின்றன. அங்ஙனம் அதிகரிக்கப்பட்ட எலெக்ட்ரான்களின் இயக்க ஆற்றல் உலோகத்தின் வெளியேற்று ஆற்றலை (work function) விட மிகுதியாக இருக்கும்பொழுது அந்த எலக்ட்ரான்கள் உலோகத்தைவிட்டே வெளியேறுகின்றன. இதனையே நாம் ஒளிமின் விளைவு (photoelectric effect) என்கிறோம். மண்டலக் கொள்கையின் மூலம் ஒவ்வொரு உலோகத்திற்கும் உட்கவர் அதிர்வெண்ணைக் கண்டுபிடிக்கலாம். குறிப்பாய், உட்கவர் அதிர்வெண்கள் கார உலோகங்களுக்கு அகச்சிகப்புப்பகுதியிலும், உயர்வு உலோகங்களுக்கு (noble metals)க் கண்ணுறு ஒளிப்பகுதி அல்லது புற ஊதாப் பகுதியில் இருக்கின்றன. உலோகங்களுக்கு நிறம் உட்கவர்நிறமாலையின் மூலம் வருகிறது. உதாரணமாய்த் தாமிரம் சிவப்பாய் இருப்பதற்குக் காரணம் அது குறைந்த அலைநீள ஒளிக்கதிரை உட்கொண்டு அதிக அலைநீள ஒளிக்கதிரைப் பிரதிப்பலிப்பதாகும். மேலும் படுஒளியின் அலைநீளம் குறையக்குறையத் தாமிரத்தின் பிரதிபலிப்புக் குணகம் (reflection coefficient) குறைந்து கொண்டே போகிறது; வெள்ளி, நீலம் கலந்த வெள்ளை நிறத்தில் இருக்கிறது. ஏனெனில் புற ஊதாக்கதிரின் அதிர்வெண்ணைவிட அதிக மதிப்புடைய மின்காந்த கதிர்வீச்சை உட்கவர்ந்து, பின் அதிலும் குறைந்த அதிர்வெண்ணுடைய நீல நிறத்தை வெளிவிடுகிறது. அதனால் உலோகங்கள் பொதுவாக நல்ல பிரதிபலிப்பான்களாயிருந்தாலும் கூட கண்ணுறு ஒளிப்பகுதியில் ஒவ்வொரு உலோகமும் சிறிது ஒளியை உட்கவருகின்றன. ஏனெனில் அடிப்படை உட்கவர் அதிர்வெண்ணின் உச்சம் புற ஊதாப் பகுதியிலோ, அகச்சிகப்புப் பகுதியிலோ இருந்தாலும் கூட அதன் வால்(tail)ப் பகுதி கண்ணுறு ஒளிப்பகுதியில் இருக்கும். அதனால், நாம் உலோகத்திலிருந்து நூறு விழுக்காடு பிரதிபலிப்பினை எதிர்பார்க்க முடியாது. உலோகங்களின் புறப்பரப்புச் செம்மையாய் இருக்கும்போது ஒளி பிரதிப்பலிப்பு பெரும மதிப்பாய் 98 விழுக்காடுகள் இருக்கும்.

(ஆ) மின்கடத்தாப் பொருள்களில் ஒளி உட்கவரப்படுதல்

அடிப்படை உட்கவர் அதிர்வெண் (fundamental absorption frequency) வரை மின்கடத்தா அயனிப்பொருள்கள் ஒளிபுகும் பொருள்களாயிருக்கும். அடிப்படை உட்கவர் அதிர்வெண் ஒளியிலுள்ள போட்டான்களுக்கு இணைதிறன் பட்டையிலுள்ள எலெக்ட்ரான்களைக் கிளர்ச்சியூட்டி ஆற்றல் இடைவெளிக்கு மேலுள்ள கடத்துப்பட்டைக்கு அனுப்புமளவிற்கு ஆற்றல் இருப்பதால் உட்கவருதல் நடைபெறுகிறது. பெரும்பாலும் மின்கடத்தாப்பொருள்களில் ஆற்றல் இடைவெளி 4 எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு அளவில் இருக்கும். அதனால், குறைந்தது கிளர்ச்சியூட்டும் போட்டானின் ஆற்றல் அளவு 4 எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டாவது இருக்க வேண்டும். இந்த

நோக்கத்தோடு பார்த்தால் அடிப்படை உட்கவர் அதிர்வெண் புற ஊதாப் பகுதியில் இருக்கும். ஆனால் படம் 12.1 இல் காட்டியபடி அடிப்படை உட்கவர் அதிர்வெண்ணுக்கும் கீழே சில அதிர்வெண்களில் உட்கவருதலின் மதிப்பு மிகுதியாயுள்ளது. அவை எலெக்ட்ரான்கள் கடத்துப்பட்டைக்குப் போவதால் வருவதில்லை. படத்தில் காட்டியுள்ளபடி பல அதிர்வெண்களில் உச்சங்கள் (peaks) ஏன் வருகின்றன என்பதனை விரிவாகக் காண்போம்.



படம் 12.1 மின்கடத்தாப் பொருள்களில் ஒளி உட்கவர்தலின் அளவுகளைக் காட்டும் வரை படம்.

ரெஸ்ட்ரால் உட்கவருதல்

அகச்சிகப்புப் பகுதியில் ஏற்படும் உட்கவருதல் ரெஸ்ட்ரால் (Restrahl) உட்கவருதல் எனப்படும். இஃது அயனிமுனைவாக்கத்தின் தளர்நேரமும் அகச்சிவப்பு ஒளியின் மின்புலத்தின் அலைவு நேரமும் சமமாயிருப்பதால் ஏற்படும் ஒத்திசைவு உட்கவருதலால் வருகிறது. அதனால், ரெஸ்ட்ரால் உட்கவருதலுக்கு முக்கியக்காரணம் பொருளில் ஏற்படும் அயனிமுனைவாக்கமாகும். கண்ணுறு ஒளிப்பகுதியில் ஏற்படும் உட்கவருதல் பொருளின் ஆற்றல் இடைவெளியிலுள்ள மட்டங்களினால் வருகிறது. அவற்றின் கிளர்ச்சிக்குத் தேவையான ஆற்றல், கண்ணுறு ஒளிப்பகுதியில்தான் உள்ளது. இதன் காரணமாய் வேற்றுப்பொருள் கலக்கப்பட்ட அயனிப்படிகங்களுக்குச் சிறப்பியல் நிறங்கள் ஏற்படுகின்றன. சான்றாய்த் தூய தாமிரசல்பேட்டுப்படிகம் நிறமில்லாமல் இருக்கும்.

ஆனால், அதில் நீர்மூலக்கூறுகள் கலக்கும்போது அதற்கு நீலநிறம் உண்டாகிறது. அதேபோல் அலுமினியம் ஆக்ஸைடு நிறமில்லாமல் இருக்கும். ஆனால் அதில் சிறிதளவு குரோமிய அணுக்களைச் சேர்த்தால் அப்பொருள் சிவப்பு நிறமாகிறது.

எக்ஸைட்டான் (exciton) **உட்கவருதல்**

ஓர் எக்ஸைட்டான் என்பது கட்டுண்ட எலெக்ட்ரான்- துளை இரட்டையாகும். அது மின்னூட்டமற்ற ஹைடிரஜன் அணு போல் செயல்படும். ஹைடிரஜன் அணுவிற்கு வெவ்வேறு ஆற்றல்மட்டங்கள் இருத்தல் போல் இதற்கும் பல ஆற்றல் மட்டங்கள் உள்ளன. ஓர் எக்ஸைட்டான் உருவாதற்குத் தேவையான ஆற்றல், ஆற்றல் இடைவெளியின் ஆற்றலை விடக் குறைவாயிருப்பதால் எக்ஸைட்டானின் ஆற்றல் மட்டங்கள் ஆற்றல் இடைவெளியில் உள்ளன. படுகதிர் போட்டான்களின் ஆற்றல் எக்ஸைட்டானின் அயனியாக்க ஆற்றலைவிட மிகுதியாயிருந்தால் ஒரு போட்டானை ஓர் எக்ஸைட்டான் உட்கொண்டு கட்டற்ற ஓர் எலெக்ட்ரானையும், ஒரு துளையையும் தோற்றுவித்து ஒளிக்கடத்தலை (photo conductivity) ஏற்படுத்துகிறது. எக்ஸைட்டானின் உட்கவர் நிறமாலை சிறு உச்சங்களாய் இயல்பாய உட்கவர் உச்சங்களுக்கு அருகில் காணப்படும் (படம் 12.1).

'*F*' மையங்களின் உட்கவருதல்

நிறமையங்கள் பற்றிச் சென்ற பகுதியில் கண்டோம். '*F*' மையங்கள் நிறமையங்களே ஆகும். ஒருபொருளில் எதிர் அயனியிருக்க வேண்டியயிடம் காலியாகி, அதில் ஓர் எலெக்ட்ரான் கட்டுண்ட நிலையில் இருந்தால், அஃது ஒரு '*F*' மையமாகும். கார ஆவிகளின்மூலம் ஒரு படிகத்தில் '*F*' மையங்களை உருவாக்கலாம். '*F*' பட்டை ஒளிஉட்கவருதல் ஒரு படிகத்தின் சிறப்பியல்பாகும். பொட்டாசியம் புரோமைடு (K Br) படிகத்தில் '*F*' மையம் ஆற்றல் இடைவெளியில் அலைநீளம் 6000 Å உள்ள சிவப்பு வரிக்குள்ள ஆற்றலைஉடைய ஆற்றல்மட்டத்தில் உள்ளது. அதனால், வெள்ளொளி அதனூடே செல்லும் போது சிவப்பு ஒளியை அஃது உட்கவருவதால் அப்படிகம் ஊதா நிறமாகத் தோன்றும். அதேபோல் ஒருபொருளின் நேர் அயனியிருக்க வேண்டிய இடம் காலியாகி, அதில் ஒருதுளை கட்டுண்ட நிலையில் இருந்தால் '*V*' மையம் உண்டாகும். அது புற ஊதா ஒளியை உட்கவரும்.

(இ) குறைகடத்திகளில் ஒளிஉட்கவருதல்

குறைகடத்திகளில் ஆற்றல் இடைவெளியின் மதிப்பு ஏறத்தாழ ஒரு எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு இருக்கும். அதனால், கிளர்ச்சியூட்டும் போட்டானின் ஆற்றல் அளவு 1 எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு இருந்தால் இணைதிறப்பட்டை எலெக்ட்ரான் இப் போட்டானை உட்கொண்டு கடத்துப்பட்டைக்குப் போக இயலும். அதனால், குறைகடத்திகளில் அடிப்படை உட்கவர் அதிர்வெண் அகச்சிகப்பு ஒளிப்பகுதியில் உள்ளது. இதற்குக் கீழுள்ள அதிர்வெண்களுடைய ஒளியை குறைகடத்திகள் தம்முள் புகவிட்டு ஒளிபுகும் பொருள்களாக மாறும். மேலும், குறைகடத்திகளுக்குரிய அத்தியாயத்தில் *P–N*

சந்தியில் ஏற்படும் ஒளி விளைவுகளாய ஒளிமின்கடத்தல், ஒளி மின்னழுத்த விளைவு ஆகியவற்றைப்பற்றி விரிவாய்க் கண்டோம். அதன் மற்றைய ஒளிப் பண்புகளை இங்குக் காண்போம். இதுவரை ஒளி உட்கவருதலைப்பற்றி விரிவாய்க்கண்டோம். சில *P–N* சந்திகள் ஒளியை உமிழும் தன்மைவாய்ந்தவையாயுள்ளன. அதனை "ஒளிஉமிழ் டையோடுகள் (Light Emitting Diodes)" என்பர். சுருக்கமாய், எல்இடி (LED) என்றும் கூறுவர். எலெக்ரான்களும், துளைகளும் சந்தியில் ஒன்றிடும் போது போட்டான்கள் உமிழப்படுகின்றன. சான்றாய்க் காலியம் – ஆர்செனைடு (Ga As) என்னும் குறைகடத்தியில் ஒன்றிடும் நிகழ்ச்சி நேராகவே நடைபெறுகிறது. அதனால் இதனை நேர்ப்பட்டை இடைவெளி (direct bandgap)யுடைய குறைகடத்தி என்பர். அஃதாவது, கடத்துப்பட்டையிலுள்ள எலெக்ட்ரான் இணைதிறப்பட்டையிலுள்ள துளையோடு ஒன்றிவிடுகிறது. ஆனால், ஜெர்மேனியம், சிலிக்கான் போன்ற குறைகடத்திகளில் ஒன்றிடும் நிகழ்ச்சி கண்ணிகள் மூலமாய் நடைபெறுவதால், அதில் வெளியாகும் ஆற்றல் படிகத்தை வெப்பப்படுத்துவதோடு நின்றுவிடுகின்றது. காலியம் ஆர்செனைடின் ஆற்றல் இடைவெளி 1.4 எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு ஆகும். அதனால் உமிழப்படும் ஒளி அலைநீளம் 9000 Å என இருக்கும். இந்த அலைநீளம் கண்ணுறு ஒளிப்பகுதியைச் சார்ந்ததில்லை. அதனால் பாஸ்பரத்தை தகுந்த அளிவில் காலியம் ஆர்செனைடுடன் கலந்தால் கண்ணுறு ஒளி உமிழப்படுகிறது. இவ்வாறு வெவ்வேறு பொருள்களைக் காலியம் ஆர்செனைடுடன் கலக்கும்போது சிவப்பு, பச்சை, மஞ்சள் போன்ற பல கண்ணுறு ஒளிகளை உமிழும் டையோடுகளைப்பெறலாம். இவை கைக்கடிகாரங்கள், அளக்கும் கருவிகள், கணக்கிடும் கருவிகள் (calculators) ஆகியவற்றில் வெளியீடுகளை எண்களில் தரப்பயன்படுகின்றன.

12.6 திரவப்படிகங்களின் (Liquid Crystals) ஒளிக்குணங்கள்

இப்பொழுது கைக்கடிகாரங்கள், அளக்கும் கருவிகள், கணக்கிடும் கருவிகள் ஆகியவற்றில் ஒளிஉமிழ் டையோடுகளுக்குப்பதிலாய்த் திரவப் படிகங்கள் பயன்படுத்தப்படுகின்றன. ஏனெனில் திரவபடிகக்காட்சி (display) அமைப்பிற்குச் செலவாகும் திறன் மிகக்குறைவே; திரவப்படிகங்களின் பயன்களைப் பற்றி விரிவாக நாம் அறிந்திருந்தாலும் சிறிது திரவப்படிகங்களின் இயற்பியல் பண்புகள் பற்றியும் தெரிந்து கொள்வது மிக அவசியம். திரவப்படிகநிலை என்பது படிக நிலையிலுள்ள திண்மப் பொருளுக்கும், படிகஉருவமற்ற திரவத்திற்கும் இடையே உள்ளதாகும். இந்நிலையிலுள்ள ஒரு பொருளுக்குச் சில பண்புகளில் திசைசார்பண்பியல்பு மிகுதியாயிருக்கும். மேலும், அது குறிப்பிட்ட அளவு பாய்மானத்தையும் (fluidity) பெற்றிருக்கும். சில கரிமப் பொருட்கள் படிக நிலையிலிருந்து திரவநிலைக்கு நேராய் மாறாமல் பலபுதுநிலைகளைக் கடந்தபின் திரவநிலையை அடைகின்றன. இத்தகைய புது நிலைகளில் பொருளின் எந்திரக் குணங்களும் (mechanical properties), சமச்சீர்க் குணங்களும் (symmetry properties) முழுதும் படிகக் குணங்கள் அல்லது திரவக்குணங்கள் போல் இல்லாமல் அவற்றிற்கு இடைப்பட்ட நிலையில் உள்ளன. இதன் காரணமாகவே அவைகளைத் திரவப் படிகங்கள் என்று கூறினர். சரியாகப் பெயரிடப்படவேண்டுமென்றால் அவைகளை இடைநிலைப் பிறைகள் (mesomorphic phases) என அழைக்கலாம். ஒரு பொருளில் இடைநிலை தோன்ற

அப்பொருளின் மூலக்கூறு, வடிவ அமைப்பில் மிகுதியாய்த் திசைசார்பண்புகளைப் பெற்றிருக்க வேண்டும். மேலும், அது நீளமாயும், குறுகியதாயும் இருக்க வேண்டும். அஃதாவது, கம்பி போன்ற இயலமைப்பினை உடையதாயிருக்க வேண்டும். ஒரு படிகத்தை திண்ம நிலையிலிருந்து திரவநிலைக்குக் கொண்டுவரும்போது இடைநிலைப் பிறைகள் தோன்ற, நாம் வெப்பமுறைகளையோ, கரைப்பான்களையோ பயன்படுத்தலாம். வெப்பமுறைகளைப் பயன்படுத்தும்போது நிமாட்டிக் (nematic), கொலஸ்டிரிக் (cholesteric), ஸ்மெக்டிக் (smectic) என்னும் மூன்றுஇடைநிலைப்பிறைகள் (intermediate phases) தோன்றுகின்றன. இதில் நமக்குத் தேவைப்படுவது நிமாட்டிக் என்னும் இடைநிலைப்பிறையாகும். நிமாட்டிக் திரவப்படிகத்தில் உள்ள மூலக்கூறுகள் நீளவாக்கில் சீரான திசைமுகப்பினை (orientation) அதிக அளவிலும், அதற்குச் செங்குத்துத் திசையில் இவ்விதச் சீரான திசைமுகப்பு இல்லாமலும் உள்ளன. திரவநிலையில் மூலக்கூறுகள் தம்மிச்சையாய்ப் பல்வேறு முகப்புநிலை கொண்டுள்ளன.



படம் 12.2 படிக, நிமாட்டிக், திரவநிலைகளில் மூலக்கூறுகளின் முகப்பு நிலைகள்.

படம் 12.2 இல் காட்டியவாறு திரவப்படிகங்கள் இருபரிமாண தகட்டைப் போன்ற இயலமைப்பினைக் கொண்டுள்ளன. ஆனால், படிகம் முப்பரிமாண இயலமைப்பு உடையது. திரவப்படிகங்கள் நிமாட்டிக் நிலையில் இருக்கும்போது அவற்றின் ஒளிக்குணங்கள், செலுத்தப்படும் மின்புலத்தை மிகுதியாய்ச் சார்ந்துள்ளன. மின் கடத்தும் இருகண்ணாடித் தகடுகளுக்கிடையே மெல்லிய ஏடுகளாயுள்ள நிமாட்டிக் பொருளில் மின்புலம் செலுத்தப்படும்போது இருமுக்கிய மின்ஒளி நிகழ்ச்சிகள் (electro optical phenomena) நடைபெறுகின்றன. குறைந்த அளவு மின்னழுத்தங்களில் இந்த மெல்லிய திரவப் படிக ஏடுகள் நிலையான பெறுங்கூறு இயலமைப்பினை உடையதாய் மாறுகின்றன. மின்னழுத்தம் மிகும்போது இந்நிலையான பெருங்கூறு இயலமைப்பில் கொந்தளிப்பு ஏற்படுகிறது. மேலும், இந்நிலையில் நிமாட்டிக் திரவப்படிகம் ஒளியைத்தன்னுள்புக

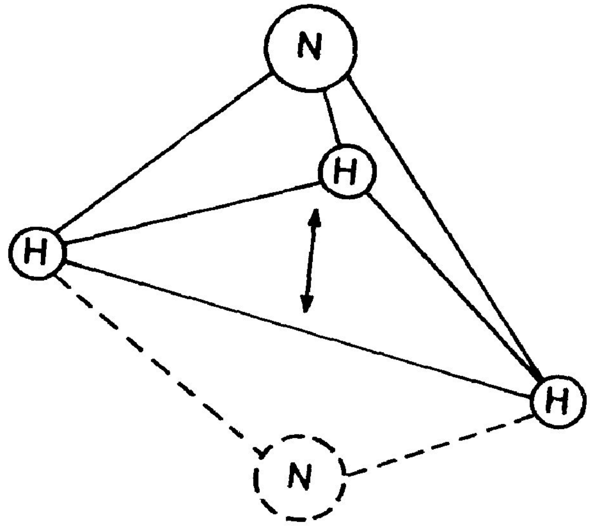
விடாது அதிகளவில் சிதறடிக்கிறது. செலுத்தப்படும் மின்னழுத்தத்திற்கு ஏற்பப்பெருங்கூறு அமைப்பு மாறி, அவற்றின்மீது ஒளிபடும்போது அவை சிதறிக்கப்பட்டு தளவிளைவு பெற்ற ஒளியாய் (polarised light) வெளிவரும். இந்நிகழ்ச்சியே திரவப்படிகங்கள் ஒளிக்காட்சிக் கருவிகளில் (optical display devices) பயன்பட உதவுகிறது.

12.7 மேசர்களும், லேசர்களும் (Masers and Lasers)

மேசர்களும், லேசர்களும் ஒளியியல் நிகழ்ச்சிகள் ஆகும். அவை இன்று அறிவியல் துறையிலும், தொழில் நுட்பத் துறையிலும் அதிகமாகப் பயன்படுகின்றன. குறிப்பாய் முழுமைப்படவியல் என்ற ஹோலோகிராபி (holography) அல்லது வில்லையில்லா ஒளிப்படவியல் (lensless photography), செய்தித்தொடர்பு துணைக்கோள்கள், வானொலி வானவியல் (Radio Astronomy), ராடார், ஒளிச்செய்தி தொடர்பு, உருக்கி இணைத்தல், துளையிடுதல், குறை கண்டறிதல் மருத்துவத்துறையில் பல நோய்களைக் கண்டுபிடித்தல், பல நோய்களுக்குச் சிகிச்சையளித்தல் முதலானவற்றில் இவை பயன்படுகின்றன. லேசர் என்பது "தூண்டு உமிழ்வு கதிர்வீச்சின் மூலம் ஒளிப்பெருக்கம் (LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) என்னும் வரியின் சுருக்கமாகும். அதேபோல் மேசர் என்பது "தூண்டு உமிழ்வு கதிர்வீச்சின் மூலம் நுண்ணலைப் பெருக்கம் (MASER: Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) " என்னும் வரியின் சுருக்கமாகும். முதலில் மேசர்த் தத்துவமே கருவியாய் செயலாக்கப்பட்டது. லேசரில் மேசர்த்தத்துவம் கண்ணுறு ஒளிப்பகுதி அதிர்வெண்களான 10^{14} லிருந்து 10^{15} ஹெர்ட்ஸ் வரை நீட்டப்பட்டிருப்பதால் அதனை ஒளியியல் மேசர் (optical maser) என்றும் கூறுவர். இன்று லேசர்த் தத்துவம் எக்ஸ் கதிர்கள் முதல் காமாக்கதிர்கள்வரை படர்ந்துள்ளது. காமாக்கதிர் லேசர்களைக் கிரேசர்கள் (Grasers) என்று பெயரிட்டுள்ளனர்.

12.7.1 அமோனியா மேசர் (Ammonia Maser)

அமோனியா மேசரே முதல் மேசராகும். மேலும் அஃது ஒருவாயு மேசராகும். அமோனியா மேசர்பற்றித் தெரிந்துகொள்ள வேண்டுமானால், அம்மோனியா மூலக்கூறின் அமைப்புப் பற்றிச் சிறிது தெரிந்துகொள்ளவேண்டும். படம் 12.3 இல் காட்டியவாறு மூன்று ஹைடிரஜன் அணுக்களும் கிடைமட்டத்தில் உள்ள ஒரு முக்கோணத்தின் மூன்று மூலைகளில் உள்ளன. இவை மூன்றும் உள்ள தளத்திற்கு மேலோ, கீழோ நைட்ரஜன் அணு இருக்கும். சில மூலக்கூறுகளில் நைட்ரஜன் அணு தாழ் ஆற்றல் மட்டத்திலும் (படத்தில் தொடர்ச்சியில்லாமல் வரையப்பட்டுள்ள கோட்டில் உள்ள நைட்ரஜன்), சிலவற்றில் நைட்ரஜன் அணு உயர் ஆற்றல்மட்டத்திலும் இருக்கும். இவ்வாறு நைட்ரஜன் அணு உயர்ஆற்றல் மட்டத்திலிருந்து தாழ் ஆற்றல் மட்டத்திற்கு பெயர்வு அடையும்போது ஆற்றல் வாய்ந்த அதிர்வெண் 23870 மெகாஹெர்ட்ஸிக்கு உரிய நுண்ணலையை வெளியிடுகிறது. அதற்குரிய அலைநீளம் 1.26 செ.மீ ஆகும். சாதாரண வெப்பநிலையில் நைட்ரஜன் அணுக்கள் உயர் ஆற்றல் மட்டத்தில் குறைவான எண்ணிக்கையில் இருக்கும். உயர்ஆற்றல்மட்டத்தை 'E_2' எனவும், தாழ்ஆற்றல் மட்டத்தை 'E_1' எனவும், E_2 வில் நைட்ரஜன் அணுக்களின் எண்ணிக்கை 'N_2' எனவும், E_1 இல் உள்ள நைட்ரஜன் அணுக்களின் எண்ணிக்கை 'N_1' எனவும் கொள்ளப்பின்வரும்



படம் 12.3 அமோனியா மூலக்கூறு. ஹைடிரஜன் அணுக்கள் அமைந்துள்ள தளத்திற்கு நேர்க்குத்தான ஓர் அச்சில் நைட்ரஜன் அணு உயர்மட்டத்திலோ அல்லது தாழ்மட்டத்திலோ அமைவதைத் தொடர்ச்சியில்லாக் கோடுகள் காண்பிக்கின்றன.

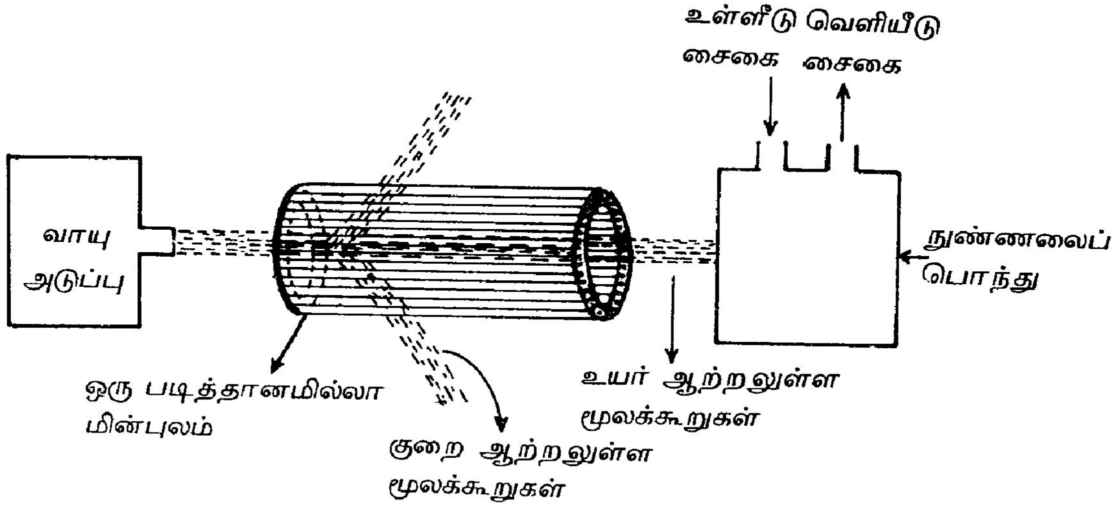
சமன்பாட்டை மாக்ஸ்வெல்-போல்ட்ஸ்மேன் சூத்திரத்தைப் பயன்படுத்தி எழுதலாம்:

$$N_2 = N_1 \,[\exp\,(-(E_2 - E_1)/kT)] = N_1 \exp\,(-h\nu/kT)$$

சாதாரண நிலைகளில் $N_2 < N_1$. தொகைத் தலைகீழாக்கம் (population inversion) என்பது $N_2 > N_1$ ஆகும். அந்நிலையில்தான் மேசர் நிகழ்ச்சி நடைபெறும். அதனால், தொகைத் தலை கீழாக்கம் கிடைக்க, நாம் தாழ்ஆற்றல்மட்ட மூலக்கூறுகளை மொத்த மூலக்கூறுகளில் இருந்து பிரித்துவிட்டால் மீதமுள்ள மூலக்கூறுகள் உயர்ஆற்றல் மட்ட மூலக்கூறுகளாகும். அவைகளை நுண்ணலை போட்டான்கள்மூலம் தூண்டிவிட்டு தூண்டு கதிர்வீச்சு கிடைக்க வழி செய்யலாம். ஏனெனில், தூண்டப்பெற்ற கதிர்வீச்சில்தான் நுண்ணலை பெருக்கம் கிடைக்கும். அமோனிய மூலக்கூறில் உள்ள இருமுனைவுத் திருப்புத்திறன்கள் இவ்விரு உயர், தாழ் ஆற்றல் மட்டங்களில் வெவ்வேறாயிருக்கும். இதனைப் பயன்படுத்தி உயர், தாழ் ஆற்றல் மட்ட மூலக்கூறுகளை ஒரு படித்தானமில்லா அல்லது சீர்மையில்லா மின்புலத்தை (non-homogeneous electric field)ச் செலுத்திப் பிரிக்கலாம்.

இயங்கும் முறை :

ஓர் அடுப்பின் (oven) மூலம் அமோனியா மூலக்கூறுகள் கிளர்ச்சியூட்டப்படுகின்றன. பிறகு, இம்மூலக்கூறுகள் மின்னேற்றம் பெற்ற கோல்களால் அமைந்த நீள்உருளைக்குழாய்க்குள் செலுத்தப்படுகின்றன. நீள்உருளையின் அச்சிலிருந்து கோல்களை



படம் 12.4 அமோனியா மேசர்

நோக்கிச் சென்றால் மின்புலத்தின் வலுமிகுந்துகொண்டே செல்கிறது. அஃதாவது, மின்புலம் கோல்களுக்கு அருகில் வலுவுள்ளதாயும், நீள்உருளையின் அச்சிற்கு அருகில் வலுவில்லாததாயும் உள்ளது. அதனால், தாழ்மட்ட மூலக்கூறுகள் கோல்களை நோக்கிச் செல்கின்றன. உயர்மட்ட மூலக்கூறுகள் கோல்களால் எதிர்க்கப்பட்டு அச்சின்வழியே சென்று, நுண்ணலைப்பொந்தை அடைகின்றன. பெரும்பாலும் நுண்ணலை பொந்திற்குள் வரும் மூலக்கூறுகள் உயர்மட்ட மூலக்கூறுகளாகவே இருக்கும். அதிர்வெண் 23870 மெகாஹெர்ட்ஸ் கொண்ட நுண்ணலைப் போட்டான்களைப் பொந்தினுள் செலுத்திக் கிளர்ச்சியுற்ற மூலக்கூறுகளோடு மோதல்கள் நடைபெறும். அதனால் கிளர்ச்சியுற்ற மூலக்கூறுகள் தூண்டப்பட்டு அவை 23870 மெகாஹெர்ட்ஸ் போட்டான்களை உமிழ்ந்து விட்டு தாழ்மட்டத்திற்கு வந்து சேருகின்றன. இவ்வாறு தூண்டிய போட்டான்களும், தூண்டலால் வந்த போட்டான்களும் மேலும் பல கிளர்ச்சியுற்ற மூலக்கூறுகளைத் தூண்டிவிட்டு ஓரியல் (coherence) மிக்க போட்டான்களின் எண்ணிக்கையை மிகுவிக்கின்றன. அதனால் நமக்கு செறிவு மிகுந்த, பெருக்கமடைந்த நுண்ணலை 23870 மெகாஹெர்ட்ஸில் கிடைக்கும்.

தூண்டப்படும் நிகழ்ச்சி சிறப்பாக நடைபெறுதற்காகவே பொந்தின் சுவர்கள் நன்கு பிரதிபலிக்கும் தன்மையுடையனவாய் இருக்கின்றன. குறிப்பாய்ப் பொந்தினுள் செலுத்தப்படும் நுண்ணலையை நிறுத்தி விட்டால் பொந்தின் சுவர்களினால் பிரதிபலிக்கப்பட்ட போட்டான்கள் உள்ளீட்டுச் சைகையாய் விளங்கும். அதனால் நுண்ணலைப் பெருக்கியை வெளியிலிருந்து சைகை ஏதும் பொந்துக்குள் வராமல் தடுத்து நுண்ணலை அலையியற்றியாய் மாற்றிவிடலாம். அங்ஙனம் இயற்றப்படும் அலை அதிர்வெண் மதிப்பு 23870 மெகாஹெர்ட்ஸ் ஆகும். இதனது அதிர்வெண்பட்டையின் அகலம் 3லிருந்து 5 கிலோ ஹெர்ட்ஸிக்குள் மிகக்குறுகியதாயுள்ளது.

அமோனியா மேசரில் அமோனியா வாயு பயன்படுத்தப்படுவதால், திண்மப்பொருளைப் போல் அதில் மூலக்கூறுகள் அடர்த்தியாயிராது. அதனால் அமோனியா மேசரின் வெளியீட்டுச்சைகையின் திறன் மிகக் குறைவு. இன்று அமோனியா மேசரைவிடத் திறம் மிக்க பல நுண்ணலை அலையியற்றிகள் உள்ளன. அவற்றில் முக்கியமானவை இயக்க அலைக் குழாய் (travelling wave tube), மேக்னட்ரான் (magnetron), ரிஃப்ளெக்ஸ் கிளிஸ்ட்ரான் (reflex klystron) ஆகும்.

12.7.2. லேசர் நிகழ்ச்சி ஏற்பட நிபந்தனைகள்

(1) பல திசைகளில் கதிர்வீச்சினைப் பரவவிடாமல், ஒரே திசையில், சமகட்டத்தில் செல்லும் போட்டான்களைக் கொண்ட செறிவு மிகுந்த ஓரியல் கதிராக லேசர் கதிர் உள்ளது. மேலும், அதில் ஒருநிறத்தன்மையும் ஒருதிசைத்தன்மையும் மிகுதியாய் உள்ளன. இவ்விதப்பண்புகளையுடைய கதிர்வீச்சை ஓரியல் கதிர்வீச்சு (coherent radiation) என்பர். **தூண்டப்பட்ட கதிர்வீச்சு** ஒன்றனால்தான் அதனை உற்பத்தி செய்யமுடியும்.

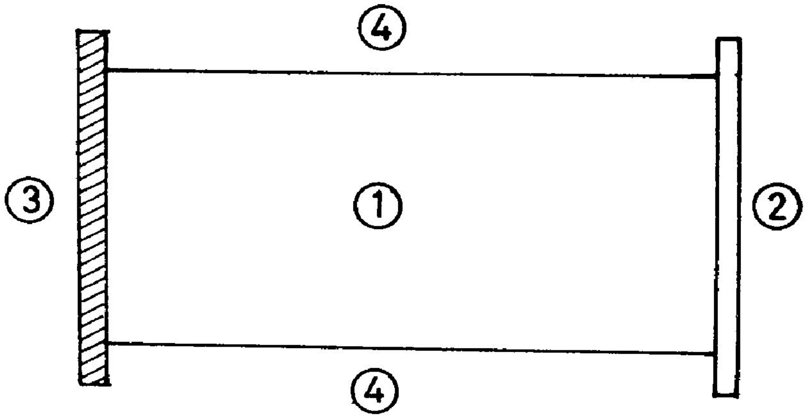
(2) தொடர்ச்சியாய்த் தூண்டப்பட்ட கதிர்வீச்சு அல்லது தொடர்ந்து லேசரிலிருந்து வெளியீட்டுச்சைகை கிடைக்கத் **தொகைத் தலைகீழாக்கம்** (population inversion) அவசியம். தொகை தலைகீழாக்கத்தை ஒளியாலேற்றத்தாலோ (optical pumping), மின்னாலேற்றத்தாலோ (electrical pumping) உருவாக்க முடியும்.

இங்ஙனம் தொகைத்தலைகீழாக்கமும், தூண்டப்பட்ட கதிர்வீச்சும் மட்டுமே லேசர் நிகழ்ச்சியை உருவாக்கமுடியும்.

12.7.3. லேசரின் தத்துவம் (Principle of Laser)

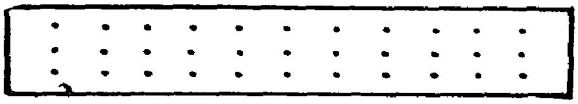
ஒருபொருளில் ஏற்றமுறைகளால் (pumping methods) உயர் ஆற்றல்மட்டத்தில் அதிக கிளர்ச்சியுள்ள அணுக்களும் தாழ் ஆற்றல் மட்டத்தில் குறைவான அணுக்களும் இருக்கும்படியாய்ச் செய்யப்படுகிறது. தன்னியல் உமிழ்வு தொடர்ந்து நடந்துகொண்டிருக்கும். அதிலிருந்து வரும் ஒரு போட்டானின் ஆற்றல், கிளர்ச்சியுற்ற அணுவின் இடப்பெயர்வின்போது வெளிப்படும் போட்டானின் ஆற்றலுக்குச் சமமாயிருந்தால், அப்போட்டான் கிளர்ச்சியுற்ற அணுவைத்தூண்டிவிடும். அதனால், கிளர்ச்சியுற்ற அணு தூண்டப்பெற்ற நிலையில் ஒரு போட்டானை உமிழும். அங்ஙனம் தூண்டுதலால் வந்த போட்டானும், தூண்டிய போட்டானும் சம கட்டநிலையில் ஒரேதிசையில் இயங்கும். இவ்விரு போட்டான்களும் மேலும் இருகிளர்ச்சியுற்ற அணுக்களைத்தூண்டி இரு போட்டான்களை உற்பத்தி பண்ணும். இங்ஙனம் போட்டான்களின் எண்ணிக்கை இரண்டிலிருந்து நான்காய் மாறும். இம்மாற்றம் தொடர்ந்து நடந்துகொண்டே போய் முடிவில் செறிவு மிகுந்த ஓரியல் கதிர்வீச்சுக் கிடைக்கும். இவ்வாறு ஒரே அதிர்வெண்ணுடைய கதிர்வீச்சுப் பெருக்கமடைகிறது. நாம் தொடர்ந்து பெருக்கமடைந்த கதிர்வீச்சினைப்பெறத் தொகைத்தலைகீழாக்கம் அதில் எப்போதும் இருந்து கொண்டிருப்பது மிக அவசியம்.

12.7.4. லேசரின் வடிவமைப்பு

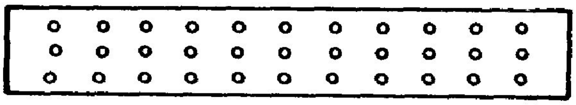


படம் 12.5 லேசரின் வடிவமைப்பு
(1) வினைபடு ஊடகம் (ஒத்ததிர்வு பொந்து) (2) சிறிது ஒளிபுகும் தன்மையுள்ள பிரதிபலிப்பான் (3) முழுமையான பிரதிபலிப்பான் (4) ஒளிபுகும் பக்கங்கள்

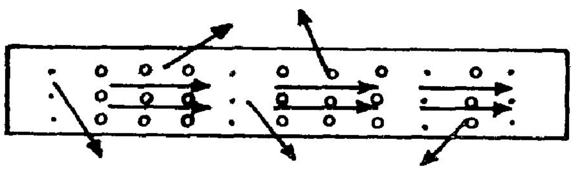
வினைபடு பொருள் (active element) நீள்உருளை வடிவில் உள்ளது. உருளைவடிவப் பக்கங்கள் ஒளிபுகும் பக்கங்களாய் உள்ளன. உருளையின் முனைப்பக்கங்களில் பிரதிபலிப்பான்கள் பொருத்தப்பட்டுள்ளன. ஒளித்தெறிப்புக்குழாய் (flash tube) மூலம் வரும் ஒளித்துடிப்புகள், வினைபடுபொருளில் உள்ள அணுக்களுக்கு ஒளியாலேற்றம் முறையில் ஆற்றலைமிகுவிக்குகின்றன. பின் கதிர்வீச்சுவெளியீடு நடைபெறுகிறது. உருளை அச்சிற்கு இணையாய் இயங்காத போட்டான்கள் அனைத்தும் ஒளிபுகும் பக்கங்கள் வழியே வெளியேறுகின்றன. அதனால் அந்தப் போட்டான்களால் கிளர்ச்சியுற்ற அணுக்களுக்கு மோதல்கள் கிடைக்கமாட்டா; அச்சினுக்கு இணையாய்ச் செல்லும் போட்டான்கள் பிரதிபலிப்பானில்பட்டுப் பிரதிபலிக்கப்படுகின்றன. அவை தம்இயக்கத்தின்போது கிளர்ச்சியுற்ற அணுக்களின்மீது மோத, தூண்டுஉமிழ்வு (stimulated emission) நடைபெறுகிறது. அதனால் தூண்டப்பட்ட போட்டான்களும், தூண்டிய போட்டான்களும் ஒரே திசையில் செல்கின்றன. இவ்வாறு தூண்டல் நிகழ்ச்சியும், பிரதிபலித்தலும் தொடர்ந்து நடைபெறுவதால் அச்சுக்கு இணையாய்ச் செல்லும் போட்டான்களின் எண்ணிக்கை மிகுந்து கொண்டே போகும். பிரதிபலிப்பான்களில் ஒன்று 10 விழுக்காடுகள் ஒளிபுகும் தன்மையுடையது. அதன்வழியே ஓரியல் கதிர்வீச்சு வெளிவரும். அதுவே வெளியீட்டு லேசர் கதிராய்ச் செயல்படுகிறது. அவ்வாறு வெளிவரும் லேசர் கதிருக்கு வெளி (space), நேரம், திசை ஆகியவற்றில் ஓரியல்பண்பு மிகுந்திருக்கும்.



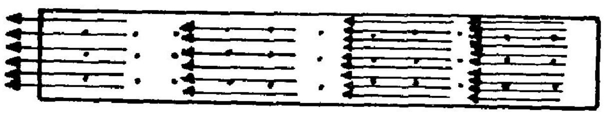
(அ) கிளர்ச்சி ஏற்படுதற்குமுன் அணுக்கள்



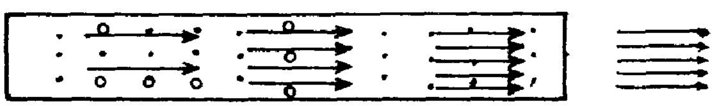
(ஆ) ஒளித்தெறிப்பு விளக்கால் கிளர்ச்சி யுற்ற அணுக்கள்



(இ) தூண்டப்பெற்ற போட்டான்கள் ஊடகத்தின் அச்சுக்கு இணையாகச் செல்தலும், மற்றவை வெளியேறுதலும்.



(ஈ) செறிவு மிகுந்த தூண்டப்பெற்ற போட்டான்கள்

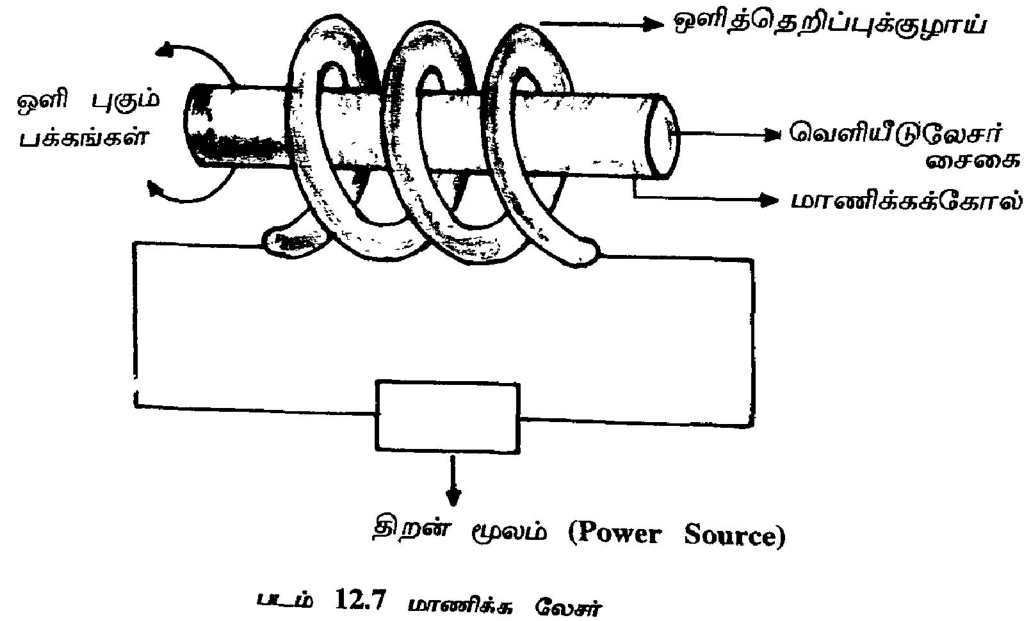


(உ) பிரதிபலிப்பானால் போட்டான்கள் பிரதிபலிக்கப் பட்டுச் செறிவு மிகுந்து, சிறிதளவு வெளியீடு லேசர் சைகையாய் வெளிவருதல்

படம் 12.6 லேசர் நிகழ்ச்சியை எளிய படங்கள் மூலம் விளக்குதல்.

12.7.5. லேசரின் பல வகைகள்

லேசர்களுள் திண்மநிலை லேசர்கள், வாயு லேசர்கள், திரவ லேசர்கள், குறைகடத்தி லேசர்கள், சாய லேசர்கள் (dye lasers) முக்கிய வகைகளாகும். திண்ம நிலை லேசர்கள் மிக்க திறனுள்ளவை. அவற்றில் மும்மட்ட, நால்மட்ட லேசர்களும் உள்ளன. மாணிக்க லேசர் (ruby laser) மும்மட்ட திண்மநிலை லேசராகும். திண்மநிலை லேசர்களில் நால்மட்ட லேசர்களே பெரும்பாலும் பயன்படுத்தப்படுகின்றன. ஏனெனில், அவற்றில் தொகைத் தலைகீழாக்கத்தை எளிதாய் ஏற்படுத்த முடியும். மேலும், அதனுள் செலுத்தப்படும் உள்ளீட்டுத்திறனில் வீணாகும் பகுதி மிகக்குறைவு. கார்பன்டை-ஆக்ஸைடு லேசர், ஹீலியம்-நியான் லேசர் ஆகியவை வாயு லேசர்களில் முக்கியமானவை. கார்பன்-டை-ஆக்ஸைடு லேசர்களில் திறன் மிகுதியாயிருப்பதால் அவை பொருள்களை வெட்டுவதற்கும், உருக்கி இணைப்பதற்கும் (welding) பயன்படுகின்றன. மேலும், ஹீலியம்-நியான் லேசர்கள் சோதனைக் கூடங்களில் ஆய்வுகள் நடத்தப்பயன்படுகின்றன. சாய லேசர்கள் நெடுக்கம் கூடிய பட்டைஅகலமுடைய கவளப் பெருக்கிகள் (quantum amplifiers) ஆகும். அவை மிக்கபெருக்கத்தையும், மிக்கஇயக்குதிறத்தையும் (efficiency) கொண்டுள்ளன. மேலும் அவைகளிலிருந்து லேசர் கதிரை எந்த அதிர்வெண்ணிலும் பெறலாம். இரண்டு மைக்ரோ மீட்டர் அலைநீளத்தில் அகச்சிகப்பு ஓரியல் கதிரை உருவாக்க, ஒளிச்செய்தி தொடர்பில் (optical communication) சாய லேசர்கள் பயன்படுகின்றன. மேலும் ஒளிச் செய்தித் தொடர்பு கருவிகளில் குறைகடத்தி லேசர்களும் பயன்படுகின்றன. அவற்றில் காலியம் ஆர்செனைடு லேசர் மிக முக்கியமானதாகும். அது 8400 ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுள்ள அலைநீள லேசர் துடிப்புக்களைத் தருகிறது.



படம் 12.7 மாணிக்க லேசர்

(அ) ரூபி லேசர் (ruby laser) **அல்லது மாணிக்க லேசர்**

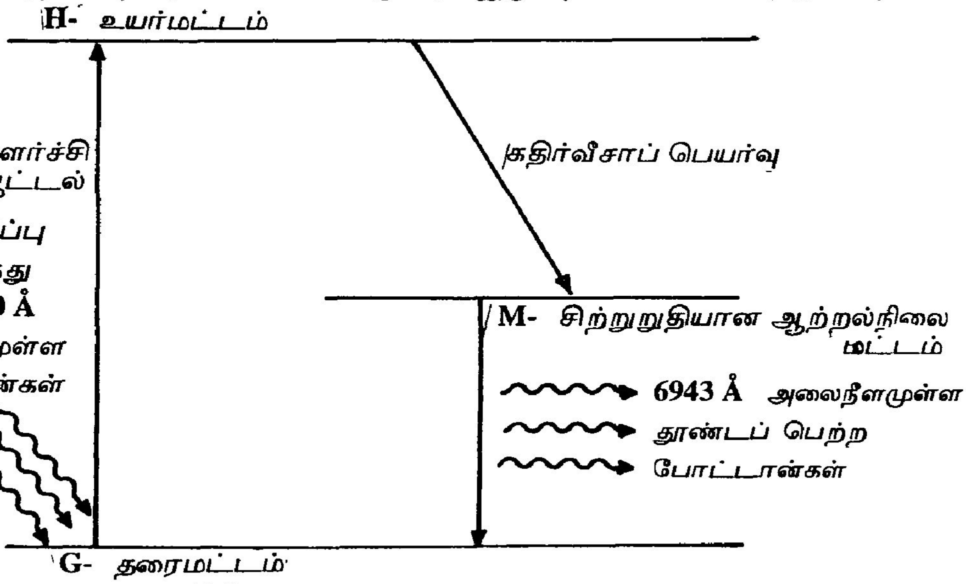
முதன் முதலாய் அமைக்கப்பெற்ற லேசர் மாணிக்க லேசராகும். இதனை 1960 இல் மைமன் (Maiman) உருவாக்கினார். இஃது ஒருமும்மட்ட லேசராகும்.

அமைப்பு :

மாணிக்க லேசர்களில் சுத்தமான அலுமினிய ஆக்ஸைடில் ($Al_2 O_3$), 0.05 விழுக்காடு குரோமியம் சேர்க்கப்பட்ட பொருள் வினைபடு ஊடகமாயுள்ளது. இதில் அலுமினியம், ஆக்ஸிஜன் ஆகியவை செயலற்றவை. குரோமியம் அயனிகள்தான் லேசர் நிகழ்ச்சியில் பங்கேற்கின்றன. வினைபடு ஊடகம் நீள் உருளைபோல் செய்யப்பட்டு அதன் இணைப்பக்கங்கள் ஒளிபுகும் தன்மையுடையனவாயுள்ளன. அதன் இருமுனைகளிலும் பிரதிபலிப்பான்கள் பொருத்தப்பட்டுள்ளன. வினைபடு ஊடகத்தின் விட்டம் ஏறத்தாழ 0.5 செ.மீ. ஆகவும், அதன் நீளம் சில செ.மீகளாகவும் இருக்கும். ஆற்றல் ஏற்று மூலமாக (pumping source) இங்கு ஓர் ஒளித்தெறிப்பு விளக்கு (flash lamp) உள்ளது. குரோமியம் அணுக்கள் 5600 ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகுகள் அலைநீளமுள்ள போட்டான்களை அதிகமாய் உட்கவரும் ஆற்றல் கொண்டவை. அந்த அலைநீளமுள்ள போட்டான்கள் ஒளித்தெறிப்பு விளக்கிலிருந்து வரும் கதிர்வீச்சில் மிகுதியாய் உள்ளன.

செயற்படுமுறை :

குரோமியம் அணுக்கள் கிளர்ச்சியுற்று, அகன்ற உயர்ஆற்றல் மட்டம் 'H' ஐ அடைந்தவுடன் அவை தரைமட்டம் 'G'க்கு வர இருபடிகளைப் பின்பற்றுகின்றன.



படம் 12.8 மாணிக்க லேசரின் மும்மட்டங்கள்

முதல்படியில் குரோமியம் அணுக்கள் அகன்ற உயர்ஆற்றல்மட்டம் 'H'லிருந்து கூர்மையான சிற்றுறுதி நிலைக்கு (metastable state)க் கதிர்வீசாப்பெயர்வில் (radiationless

transition) வரும். இதன் மூலம் வெளிவரும் சிறுஆற்றல் படிக அணிக்கோவையை வெப்பப்படுத்துவதோடு நின்றுவிடும். அதனால், இக்கதிர்வீசாப்பெயர்வுகளில் போட்டான்கள் வெளிவரா. குரோமியம் அணுக்கள் '*M*' என்னும் ஆற்றல் நிலையில் நிறைய மில்லி செகண்டுகள் தங்கியிருக்கும். மேலும், '*M*' விருந்து தன்னியல் வெளியீட்டால் தரைமட்டத்திற்குச் சில அணுக்கள் வரும். அவை சாதாரணமான ஒளிர்தலே (fluorescence) ஆகும். கிளர்ச்சியூட்டும் கதிர்வீச்சு (5600 Å) போதுமான அளவு செறிவுடையதாயிருந்தால், அஃதாவது, ஏற்றும் நிகழ்ச்சி (pumping action) திறம்பட நடைபெற்றால் உயர்மட்டம் '*H*' இல் தரைமட்டத்தைவிட மிகுதியான எண்ணிக்கையில் அணுக்கள் இருக்கும். இதனையே நாம் தொகைத் தலைகீழாக்கம் (population inversion) என்கிறோம். தன்னியல் வெளியீட்டால் தோன்றிய போட்டான்கள் (6943 Å) வினைபடு ஊடகத்தின் ஊடேசெல்லும்போது அவை '*M*' என்னும் ஆற்றல் மட்டத்திலுள்ள அணுக்களைத்தூண்டிவிட்டுக் கதிர்வீச்சினை வெளிவிடும்படி செய்கின்றன. இவ்விதமாக 6943 Å அலைநீளம் உள்ள போட்டான்கள் வினைபடு ஊடகத்தின் முன்னும் பின்னுமாக பல எதிரொளிப்புகளையடைந்து அச்சினுக்கு இணையாய் இயங்குவதால் தூண்டு கதிர்வீச்சின் செறிவு மிக அதிகமாயிருக்கும். இக்கதிர்வீச்சில் தூண்டிய போட்டான்களும், தூண்டுதலால் வந்த போட்டான்களும் சம கட்டத்திலும், ஒரே திசையிலும், ஒரே ஆற்றலிலும் இயங்குவதால் அப்போட்டான்களின் அதிர்வெண்கள் சமமாயிருக்கும். மேலும் வெளி, நேரம், திசை ஆகியவற்றில் ஓரியல் பண்புமிக்க ஓரியல் கதிர்வீச்சாயும் இருக்கும். மாணிக்க லேசர்களின் அலைநீளம் 6943 Å அல்லது அதிர்வெண் 4.32×10^{14} ஹெர்ட்ஸ் ஆகும். மாணிக்க லேசரின் பிரதிபலிப்பான்களில் ஒன்று சிறிது ஒளிபுகும் தன்மையுடையது. அதன் மூலம் லேசர் வெளியீடு கிடைக்கும். மாணிக்க லேசரின் அதிர்வெண் கண்ணுறு ஒளிநிறமாலையின் சிவப்புப் பகுதியில் உள்ளது. லேசர் வெளியிடும் ஒலித்தெறிப்பின் கால அளவு ஏறத்தாழ 300 மைக்ரோ செகண்டாயும், அவ்வொளித்தெறிப்பின் திறன் 10,000 வாட்டாயும் இருக்கும்.

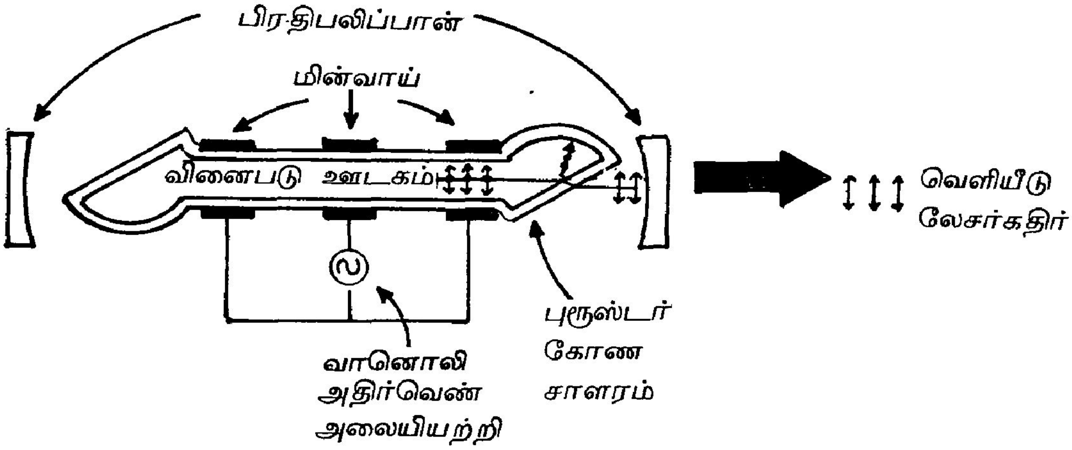
குறிப்பு :

தொடர்ச்சியான கதிர்வீச்சினைத்தரும் மாணிக்க லேசர் 1962 இல் பெல் ஆய்வுக் கூடத்தில் உருவாக்கப்பட்டது. அதில் பாதரச மின்பொறி விளக்கும் (mercury arc lamp) குழி ஆடிகளும் (concave mirrors) பயன்படுத்தப்பட்டுக் கிளர்ச்சியூட்டும் கதிர்வீச்சின் செறிவு அதிக அளவில் உயர்த்தப்பட்டு ஆற்றல் ஏற்றம் சிறப்பாய் நடைபெற வழிசெய்யப்பட்டிருந்தது.

(ஆ) ஹீலியம் - நியான் லேசர் (Helium-Neon laser)

ஹீலியம்-நியான் லேசரில் ஒரு மின்னிறக்கக் குழாய் (discharge tube) உள்ளது. ஹீலியம்-நியான் லேசர்களில் மின்னிறக்கக்குழாய்கள் பல்வேறு நீளங்களையுடையனவாயும், ஹீலியம், நியான் ஆகிய வாயுக்கள் பல்வேறு அழுத்தங்களில் உள்ளனவாயும் அமைக்கப்படுகின்றன. அதனால், இவ்வாயு லேசரின் செயல்திறன் மின்னிறக்கம் நடைபெறும் நிலைகளையும், லேசரின் நீள, அகலங்களையும், வாயுக்கலவையின்

அழுத்தங்களையும் பொருத்து அமையும். மின்னிறக்கக்குழாயின் நீளமும், திறன் வெளிப்பாடும் நேர்விகிதத்தில் அமையும். 33 செ.மீ நீளமுடைய குழாயைப் பயன்படுத்தினால் பெரும மதிப்பாய் 12 மில்லி வாட்டுகள் திறன் வெளிப்பாடு கிடைக்கும். அதற்காகக் குழாயின் நீளத்தைத் தன்னிச்சையாய் மிகுதிப்படுத்திக் கொண்டு போக முடியாது.

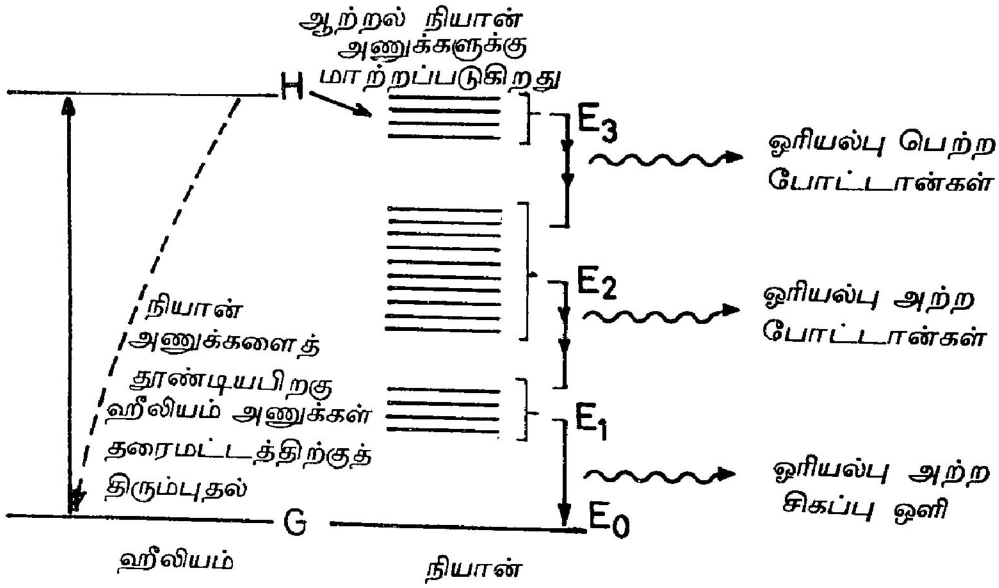


படம் 12.9 ஹீலியம்- நியான் லேசரின் அமைப்பு

படம் 12.9 இல் ஹீலியம்- நியான் லேசரின் வடிவமைப்புக் காண்பிக்கப்பட்டுள்ளது. இதில் வினைபடு ஊடகமாக ஒரு மின்னறக்கக்குழாய் உள்ளது. அதனுள் ஹீலியம் மற்றும் நியான் கலந்த வாயுக்கலவை உள்ளது. முதன்முதலில் உண்டாக்கப்பெற்ற ஹீலியம்-நியான் லேசரில் நியான் 90 விழுக்காடுகளும், ஹீலியம் 10 விழுக்காடுகளும் கலக்கப்பெற்றிருந்தது. இந்த வாயுக்கலவையில் எலெக்ட்ரான் மோதுகைகளால் தொகைத் தலைகீழாக்கம் ஏற்படுத்தப்படுகிறது. இந்த வாயுக்கலவையில் ஹீலியம் வாயு ஏறத்தாழ 1.மி.மீ பாதரச அழுத்தத்திலும், நியான் வாயு 0.1.மி.மீ பாதரச அழுத்தத்திலும் உள்ளன. மின்னிறக்குழாயின் இருபக்கங்களிலும் இருசாளரங்கள் (windows) படத்தில் காட்டியபடி புரூஸ்டர் கோணத்தில் (Brewster's angle) சாய்வாய் இருக்கும்படி அமைக்கப்பட்டுள்ளன. இச்சாளரங்கள் வழியே வந்துதான் ஒளியானது கோளக வடிவ பிரதிபலிப்பான்களின் மீது பட முடியும். இவ்வமைப்பின்மூலம் விரும்பத்தகாத எதிரொளிப்புகள் நிகழா. மேலும் கோளப் பிரதிப்பலிப்பான்களைப் பயன்படுத்துவதன்மூலம் பிரதிபலிக்கப்பட்ட ஒளி மின்னிறக்குழாயின் அச்சிற்கு இணையாய்ச் செல்லமுடியும். படத்தில் புரூஸ்டர்கோணச்சாளரத்திற்கு அருகில் உள்ள செங்குத்தான அம்புக்குறிகளும், புள்ளிகளும் தளவிளைவுற்ற ஒளியின் திசைகளைக் குறிக்கின்றன. படத்தின் தளத்தில் ஏற்படும் தளவிளைவுற்ற ஒளியை இணை அம்புக்குறிகளும், படத்தளத்திற்கு நேர்க்குத்தான தளத்தில் ஏற்படும் தளவிளைவுற்ற ஒளியைப் புள்ளிகளும் (dots) குறிக்கின்றன. அதனால் சாளரம் ப்ரூஸ்டர் கோணத்தில் சாய்ந்துள்ளதால் அது படத்தின்தளத்தில் தளவிளைவுற்ற ஒளியை மட்டும் பிரதிபலிப்பானில் படும்படி செய்யும். மேலும், அது மற்ற ஒளிகளைப் பிரதிபலிப்பானில் படாதபடி செய்துவிடும். அதனால் வெளியீட்டு லேசர் கதிர் படத்தின்

தளத்திற்கு இணையாய் அலைவுறும் தளவிளைவுற்ற ஒளிக்கதிராய் அமையும். மேலும், மின்னிறக்கக்குழாயில் மின்னிறக்கம் ஏற்பட 25 விருந்து 30 மெகாஹெர்ட்சு பகுதியில் செயற்படும் ஒரு வானொலி அதிர்வெண் அலையியற்றி (radio frequency oscillator) இணைக்கப்பட்டுள்ளது.

செயற்படுமுறை



படம் 12.10 ஹீலியம்- நியான் ஆற்றல் மட்டங்கள்

28 மெகாஹெர்ட்ஸ் அதிர்வெண்ணுடைய அலையியற்றி முதலில் ஹீலியம் அணுக்களைக் கிளர்ச்சியூட்டி 'H' என்ற உயர்மட்ட ஆற்றல் நிலைக்கு ஏற்றுகிறது. இவ்வாறு கிளர்ச்சியுற்ற ஹீலியம் அணுக்கள் தொடக்க ஆற்றல் நிலை 'E_o' இல் உள்ள நியான் அணுக்களோடு மோதி ஒத்திசைவு இட மாற்றல் (resonance transfer) முறையில் அவற்றை 'E_3' ஆற்றல்நிலைக்கு உயர்த்திவிட்டு தரைமட்டமான 'G' க்கு வந்துவிடுகின்றன. 'E_3' என்ற ஆற்றல்நிலையில் நான்கு தனித்தனியான ஆற்றல்மட்டங்கள் உள்ளன. லேசர்விளைவு ஏற்படும் முன் நியான் அணுக்களிலுள்ள பெரும்பான்மையான எலெக்ட்ரான்கள் 'E_3' என்ற கூர்மையான சிற்றுறுதி நிலைக்கு உயர்த்தப்படல் வேண்டும். பின் 'E_3' க்கும் 'E_2' க்கும் இடையே தூண்டு உமிழ்வு ஏற்படும். இந்த உமிழ்வில் பல அலையெண்களைக்கொண்ட லேசர்கதிர் இருக்கும். 'E_2', நெருக்கமாயிருக்கும் பத்துத்தனித்தனியான ஆற்றல்மட்டங்களை உடையதாய் இருப்பதால் E_3 க்கும் E_2 க்குமிடையே பல்வகைப்பெயர்வுகள் நிகழலாம். இதனாலேயே பல அதிர்வெண்கள் லேசர் கதிரில் உள்ளன. நியான் அணுக்கள் E_2 விருந்து E_1க்கு தன்னியல் உமிழ்விலும், E_1விருந்து

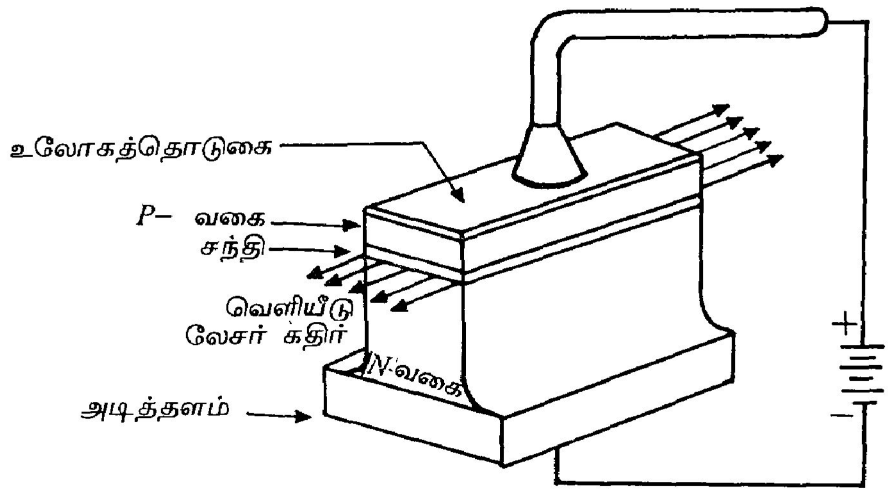
E_0க்கு விரவல் பெயர்விலும் (transition by diffusion) படிப்படியாய் மாறும்போது முடிவில் அவற்றின் கிளர்ச்சிக்குக் காரணமான மிகுதிஆற்றல் சுழியாகிவிடுகிறது. இவ்வாறு நியான் அணுக்கள் E_2 லிருந்து E_1 க்கும், E_1 லிருந்து E_0 க்கும் மாறும்போது லேசர் விளைவு ஏற்படுவதில்லை. E_0 ஐ அடைந்த நியான் அணுக்கள் மறுபடியும் 'H' ஆற்றல் மட்டத்திலுள்ள ஹீலியம் அணுக்களால் தூண்டப்பெற்று E_3 ஐ அடைகின்றன. அதனால் மறுபடியும் தூண்டப்பெற்ற கதிர்வீச்சு வெளிப்படும். E_3 நிலையிலுள்ள எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை மற்ற நிலைகளிலுள்ள எலெக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கையைவிட மிகுதியாயிருப்பதால் வெளிப்படும் லேசர் கதிரும் தொடர்ச்சியாய் வந்து கொண்டிருக்கும். ஹீலியம் 1 மி.மீ பாதரச அழுத்தத்திலும், நியான் 0.1மி.மீ பாதரச அழுத்தத்திலும் இருக்கும்போது வெளியிடப்படும் லேசர் கதிரின் அலைநீளங்கள் முறையே 1.1409, 1.1523, 1.1601 மைக்ரான்கள் ஆகும். இதில் 1.1523 மைக்ரான்கள் அலைநீளமுள்ள கதிர்வீச்சின் செறிவு மிகுதியாய் இருக்கும். இவ்விருவாயுக்களின் அழுத்த விகிதங்களை மாற்றும்பொழுது நமக்குப் பல்வேறு அலைநீளங்களுள்ள லேசர் கதிர் கிடைக்கும். பெரும்பாலும் இருஅலைநீளங்களான 0.6328, 1.523 மைக்ரான் தவிர அனைத்து அலைநீளங்களின் சராசரி 1.15 மைக்ரானாயிருக்கும். ஹீலியம்-நியான் லேசரின் வெளியீடு திறன் சில மில்லிவாட்டே இருப்பதால் இவை ஆய்வுக்கூடங்களில் சில சோதனைகள் நடத்தவும், முழுமைப்படம் என்ற ஓலோகிராம் (hologram) எடுக்கவும், லேசர் அறுவைசிகிச்சையில் இலக்கை குறி (aiming) பார்க்கவும் பயன்படுகின்றன.

(இ) காலியம்-ஆர்சினைடு டையோடு லேசர் (Gallium-Arsenide diode laser)

இஃது ஒரு P–N சந்தி உட்செலுத்தி லேசர் (P–N junction injection laser) வகையைச் சார்ந்ததாகும். காலியம் ஆர்சினைடின் ஒளிவிலகலெண்மிகுதியாயிருப்பதால் அதன் முனைகளில் பிரதிபலிக்கும் பூச்சுகள் பூசவேண்டுவதில்லை. சந்தியின் இருபக்கங்கள் பளப்பளப்பாக மெருகிடப்பட்டும் தட்டையாயும் ஒன்றனுக்கொன்று இணையாயும் இருக்கும்படி செய்யப்பெற்றிருக்கும்.

செயற்படுமுறை :

இருமுனையம் அல்லது டையோடில் முன்னோக்குச் சார்பு மின்னழுத்தத்தை மிகுவிப்பதால் 'N' பகுதியிலுள்ள எலெக்ட்ரான்கள் 'P' பகுதியினுள் சென்று அங்குள்ள துளைகளில் விழுகின்றன. 'P' பகுதியில் ஒருமிகக்குறுகிய பகுதியில் மிகுதியான எலெக்ட்ரான்களும், துளைகளும் குவிகின்றன. இக்குறுகிய பகுதியின் அகலம் ஒரு மைக்ரோ மீட்டர் அளவில் இருக்கும். ஓர் எலெக்ட்ரானும், ஒருதுளையும் இணைந்திடும் நிகழ்ச்சியை நாம் ஒன்றிடுதல் (recombination) என்கிறோம். அப்போது ஒரு போட்டான் வெளிவிடப்படும். இந்த வினைபடு (active) பகுதியில் ஒன்றிடு முறைகளால் (recombination processes) அதிகமாக போட்டான்கள் வெளியிடப்படுகின்றன. இப்போட்டான்கள், மின்புலத்தால் உள்ளே தள்ளப்படும் எலெக்ட்ரான்களை துளைகளினுள் விழச்செய்து, ஒன்றிடுதலின் வீதத்தை அதிகப்படுத்துகின்றன. இதனால், மேலும் அதிகமான போட்டான்கள் வெளிவிடப் படுகின்றன. முதல் போட்டானின் தூண்டுச் செயலால் வெளிவிடப்படும் இரண்டாம் போட்டான், முதல் போட்டானைப் போலவே சம



படம் 12.11 காலியம்-ஆர்சினைடுடையோடு லேசர்

கட்டத்தையும், ஒரே ஆற்றலையும் ஒரே திசையையும் பெற்றிருக்கும். அதனால், வெளியிடப்படும் ஒளி ஓரியல் ஒளியாகும். *P–N* சந்திக்கு இணையான திசைகளில் இந்த ஒளி வெளிவிடப்படுகின்றது (படம் 12.11). இது நமக்கு லேசர் வெளியீட்டுக் கதிராகக் கிடைக்கிறது. இந்த லேசரில் ஒன்றிடும் முறையானது எலெக்ட்ரானானது '*N*' பகுதி கொடையணு ஆற்றல் மட்டத்திலிருந்து '*P*' பகுதி ஏற்பு அணு ஆற்றல் மட்டத்திலுள்ள துளைக்கு நேரடியாய்ப் பெயர்வு செய்யும் போது நடக்கிறது. காலியம் ஆர்சினைடு டையோடு லேசரில் வெளிவரும் ஒளியின் அலைநீளம் கொடையணுக்கள், ஏற்பு அணுக்கள் ஆகியவற்றின் செறிவைப் பொருத்தது. குறிப்பாய்க் கொடையணுக்களும், ஏற்பு அணுக்களும் 10^{24}/ மீ^{3} என்னும் செறிவில் இருந்தால் வெளிவரும் அலைநீளங்கள் முறையே 0.9020, 0.8425, 0.8370 மைக்ரான் ஆகும். 1963 ஆம் ஆண்டில் இறுதியில் வந்த குறைகடத்தி லேசர்கள் இன்று ஒளிச்செய்தித் தொடர்பில் மிகுதியாய்ப் பயன்படுகின்றன. அஃதாவது, குறைகடத்தி லேசர் வெளியீட்டு சைகையைப்பயன்படுத்தி ஒளி அதிர்வெண்களில் எளிதாக அலைப்பண்பேற்றம் செய்ய முடியும். மேலும், ஒளியியல் அதிர்வெண்களில் அதிகச் செய்திகளையும் அனுப்ப முடிவதால் இன்று ஒளிச்செய்தித் தொடர்பு முறைகள் பெருமளவில் முன்னேறிவருகின்றன. தற்போது லேசர் டையோடுகளில் பல அடுக்குகள் அல்லது பல *P*, *N* பகுதிகள் கொண்ட சீரில்லா அமைப்பு (heterostructure) பயன்பாட்டில் உள்ளது. வினைபடு *P*, *N* பகுதிகள் குறுகியபட்டை இடைவெளியை உடையதாயும், அதற்கு மேலும் கீழும் உள்ள *P*, *N* பகுதிகள் விரிந்தபட்டை இடைவெளியை உடையதாயும் உள்ளன. இதனால் ஒன்றிடும் எலெக்ட்ரான்-துளைச்செறிவு அதிகமாயும், ஓரியல் பண்பு மிகுந்த லேசர் கதிரும்

கிடைக்கிறது. இன்டியம்-பாஸ்பைடு குறைகடத்தி லேசர் டையோடு ஓரியல் ஒளியை 1.2 மைக்ரானிலிருந்து 1.6 மைக்ரான்வரை உள்ள அலைநீளங்களில் தருகிறது.

12.7.6 லேசரின் பயன்கள்

லேசர் கதிரில் மிகுந்த ஒளிச்செறிவும், மிகுந்த ஒற்றை நிறத்தன்மையும் (monochromocity), மிகுந்த ஓரியல் பண்பும், மிகுந்த ஒற்றை திசைத்தன்மையும், (directionality) இருப்பதால் அது பல வேலைகளுக்குப் பயன்படுகிறது.

(1) ***செய்தித்தொடர்பில் லேசர்கள்*** (lasers in communication):

குறைவான திறனை உபயோகப்படுத்தி ஆயிரக்கணக்கான தொலைக்காட்சி நிகழ்ச்சிகளையும், ஆயிரக்கணக்கான நேரடித் தொடர்பு தொலைபேசி உரையாடல்களையும் உலகமுழுவதும் ஒளிச் செய்தித் தொடர்பு மூலம் ஒளி, ஒலிப்பரப்பவும், பெறவும் முடியும். நிலவுக்குக் கூட லேசர் ஒளி அனுப்பட்டு அங்கிருந்து பிரதிபலித்த ஒளியைத் திரும்பப் பெறப்பட்டுள்ளது. அதனால், விண்வெளியில் செய்தித்தொடர்பு கொள்வதற்கும், கோள்கள், துணைக்கோள்கள், செயற்கைத் துணைக்கோள்கள் ஆகியவற்றிற்கு இடையே செய்தித்தொடர்பு கொள்ளவும் லேசர் கதிரைப்பயன்படுத்தலாம்.

(2) ***கணிப்பொறிகளில் லேசர்*** (laser in computers):

ஐ.பி.எம் (I.B.M.) கழகம் கணிப்பொறிகளில் லேசரை எவ்வாறு பயன்படுத்தலாம் என்பதனைத் தீவிரமாய் ஆய்வுகள் செய்து வருகிறது. மேலும், ஒரு கணிப்பொறியிலிருந்து மறுகணிப்பொறிக்கு நினைவுவட்டு (memory disc)வில் உள்ள செய்திகளைத் திறம்பட மாற்றவோ, பெறவோ முடியும் என நிரூபிக்கப்பட்டுள்ளது. இங்கு நாம் ஒன்றனை மறந்துவிடக்கூடாது. லேசர்கதிரின் மூலம் செய்திகளை அனுப்பும் வேகம் நடைமுறையில் உள்ள செய்தித்தொடர்பு கருவிகளில் இருப்பதைவிட ஆயிரம் மடங்குகூடுதலாயிருக்கும். லேசர் ஒளியை வழிநடத்திச்செல்ல கண்ணாடியால் ஆன ஒளி இழைகள் அல்லது நார்கள் (optical fibres) உள்ளன. அதனால் செய்தி அனுப்பும்போது ஏற்படும் இழப்புகள் குறைகின்றன.

(3) ***அளவியலில்*** (metrology) ***லேசர்*** :

லேசர்களின் மூலம் நிலங்களைத் துல்லியமாய் அளக்கவும், ஏதேனும் ஈரிடங்கள் ஓரிணைப்பெறுமையில் இருக்கிறதா எனப்பார்க்கவும் முடியும். லேசர் குறுக்கீட்டுவிளைவுமானி (laser interferometer) மூலம் ஒரு மீட்டர் நீளத்தை மிகத்துல்லியமாய் நிலைத்தரம் (standard) மிக்கதாய் அளவெடுக்கலாம்.

(4) ***அறிவியலில் லேசர்*** :

லேசர் கதிர்களினால் சில வேதியியல் மாற்றங்கள் விரைவாய் நடைபெறவும், மூலக்கூறுகளிடையே உள்ள அணு இணைப்புகளை உடைத்துப் புதிய வேதியியற் கூட்டுப்பொருள்களை உருவாக்கவும் முடியும். அணுக்கரு இணைவை சிறப்பான முறையில்

உருவாக்கவும் முடியும். புகழ்வாய்ந்த மைக்கல்சன்-மார்லே (Michelson-Morley) சோதனையில் லேசர் கதிரைப்பயன்படுத்தி மின்காந்த அலைகள் பரவ ஈதர் எனும் ஊடகம் தேவையில்லை என நிரூபிக்கப்பட்டது. லேசர்கதிரைப் பயன் படுத்தியதால் சாதாரண ஒளியைப் பயன்படுத்திக் கிடைத்தவிடையை விடச் சுமார் 50 மடங்கு துல்லியமாக விடை கிடைத்தது. மேலும், சாதாரண ஒளியைப்பயன்படுத்தி நிறமாலையை ஒளிப்படம் எடுக்கும்போதும், இராமன் கோடுகளைப் படம் எடுக்கும் போதும் ஒளிப்படக்கருவியைத் திறந்து வைத்திருக்க வேண்டிய காலம் மிக அதிகமானதாகும். ஆனால், லேசரைப்பயன்படுத்தி மேற்கண்டவற்றைப் படம் எடுத்தால் மிகக் குறைந்த நேரம்தான் தேவைப்படும். மேலும் நிறமாலைவரிகளும், இராமன் கோடுகளும் செறிவு மிகுந்ததாகக்காணப்படும். இவ்வாறு எத்தனையோ வழிகளில் அறிவியல் துறையில் லேசர்கள் பயன்படுகின்றன.

(5) **ஒளிப்படத்துறையில் லேசர் :**

லேசரைப்பயன்படுத்தி வில்லையில்லா முப்பரிமாண ஒளிப்படத்தைக் குறுக்கீட்டு விளைவு மூலமாய் எடுக்கமுடியும். இம்முறையை முழுமைப்படவியல் அல்லது ஓலோகிராபி (holography) என்பர். ஓலோ (holo) என்றால் முழுமை என்று பொருள்படும். அஃதாவது, சாதாரணமான ஒளிப்படம் எடுக்கும்போது பொருளிலிருந்து பிரதிபலிக்கப்படும் ஒளியின் வீச்சுமட்டும் ஒளிப்படலத்தில் (photographic film) பதிவு செய்யப்படுகிறது. பொருளிலிருந்து வரும் ஒளி அலையின் கட்டம் பதிவு செய்யப்படுவதில்லை. ஆனால் ஓலோகிராபியில் ஒளிவீச்சுடன், கட்டமும் குறுக்கீட்டு விளைவின்மூலம் பதிவு செய்யப்படுவதால் நமக்குப் பொருளின் முப்பரிமாண வடிவம் கிடைக்கிறது. குறுக்கீட்டு விளைவின் காரணமாய் ஏற்படும் ஒளிப் பட்டைகளைப் பதிவாக்கப்பட்ட தகட்டினை ஓலோகிராம் (hologram) என்பர். இஃது ஒளிப்படலத்திற்குச் சமமானதொன்றாயிருந்தாலும் இதற்குப் பலவிதச் சிறப்பியல்புகள் உள. முதலாவதாய் ஓர் ஓலோகிராமில் பல செய்திகளை அல்லது படங்களைப் பதிவு செய்யலாம். மேலும், ஓலோகிராம் ஒன்று உடைந்தால் உடைந்த ஒவ்வொரு துண்டும் ஓர் ஓலோகிராமாய் விளங்கும். இந்த முழுமைப்படமுறை இரகசியச் செய்திகளை அனுப்பவும், மருத்துவத்துறையில் நுண்உயிரிகளின் இயக்கத்தையும் அமைப்பையும் அறியப்பயன்படுகிறது. மேலும், தொழிற்துறையில் புறப்பரப்பின் செம்மையை அறியவும் பயன்படுகிறது. சில பொருள்களில் ஒளிஉட் செல்லும் போது தகைவினால் இரட்டை ஒளிவிலகல் (doubled refraction) ஏற்படும். இதனை ஒளிமீட்சி விளைவு (photoelastic effect) என்கிறோம். இதன்மூலம் பொருளில் அதிகமாய்த் திரிபுடைய (strained) பகுதிகளை லேசரைப்பயன் படுத்தி கண்டுபிடிக்கலாம்.

(6) ராடாரும், நெடுக்கம் காணும் முறையும்

துடிப்பு வகை, திட நிலை படிக லேசர்கள் ராடாரிலும், பெருந்தொலைவில் உள்ளவைகளைக்காணும் முறையிலும் நல்லமுறையில் பயன்படுகின்றன. மிகத்தூரத்திலுள்ள விண்மீன்கள், கோள்கள் ஆகியவற்றின் தூரத்தை மீட்டர் சுத்தமாகக் கண்டுபிடிக்கத் தூரவியல் (telemetry) துறையில் லேசர் பயன்படுகிறது. நெடுக்கக்கண்டுபிடிப்பில் பயன்படும் லேசர் அமைப்பை லிடர் (lidar) என்று அழைக்கின்றனர். லிடர் என்பது

ஓரியல் ஒளியின்மூலம் பொருளின் இருப்பிடத்தையும், தொலைவையும் காணல் (coherent light detecting and ranging) என்பதின் சுருக்கமாகும். டாப்ளர் லேசர் ராடார் (doppler laser radar) நெடுக்கம் காண மிகவும் உதவியாயுள்ளது.

(7) தொழிற்சாலைகளில் லேசர்

துடிப்புத்திடநிலை லேசர், நுண்பற்றவைப்பிலும் (micro soldering) மிக நுட்பமான பொருள்களில் துளையிடவோ, அவைகளை வெட்டவோ (microcutting) பயன்படுத்தப்படுகிறது. இங்ஙனம் எந்திரங்களால் போட முடியாத நுண்துளைகளைப் பொருளுக்கு எத்தீங்கும் வராமல் லேசரால் போட முடியும். மேலும், தொழிற்சாலைகளில் உற்பத்தி செய்யப்படும் பொருள்களின் தரத்தை வரையறுக்கவும் லேசர் பயன்படுகிறது.

(8) மருத்துவத்துறையில் லேசர்

புற்றுநோய் சிகிச்சையிலும், தோலில் உள்ள கட்டிகளை குணமாக்குவதிலும் லேசர்கதிரைப்பயன்படுத்தலாம். மேலும், பிரிந்த விழித்திரையை (retina) இணைக்கவும் லேசரைப் பயன்படுத்தலாம். இந்த விழித்திரை இணைப்பினை அரை செகண்டில் நோயாளிக்கு எவ்விதத்தொல்லையும் இல்லாமல் செய்து முடிக்கலாம். மேலும், மூளையில் ஏதேனும் கட்டி இருந்தால் இரண சிகிச்சையைத் தவிர்த்து, கத்தி, சுத்தியல் இல்லாமல் லேசரைப் பயன்படுத்தி அதற்குச் சிகிச்சை செய்யலாம். மேலும், மேலைநாடுகளில் வேலையில் ஈடுபடும் எருதுகளை மலடாக்கவும், பெண்கள் தங்கள் உடலை அழகாக அமைக்கவும் லேசர் சிகிச்சை முறைகள் நடைமுறையில் உள்ளன.

சுருக்கம்

1. ஒளிர்தல், நின்றொளிர்தல் மூலமாக அதிக அதிர்வெண்ணுடைய ஆற்றல் கண்ணுறு ஒளியாக மாற்றப்படுகிறது.
2. நிறமையங்கள் பொருளில் வேற்றுப்பொருள் அணுக்கள் இருப்பதால் ஏற்படுகின்றன. பொருளின் குறிப்பிட்ட நிறத்திற்கு இந்த நிறமையங்களே காரணமாகும்.
3. தன்னியல் உமிழ்விற்குப் புறச்செயலிகள் தேவையில்லை. மேலும், அது பல நிறத்தன்மைவாய்ந்ததாகும். தூண்டு உமிழ்விற்குப் புறச்செயலிகள் தேவை. அஃது ஓரியல் கதிர்வீச்சாகும்.
4. பெரும்பாலும் உலோகங்கள் ஒளிபுகாப் பொருட்களாயும், மின்கடத்தாப் பொருள்கள் ஒளிபுகும் பொருள்களாயும் உள்ளன. இதனை வரையறுப்பது பொருளின் ஒளிவிலகல் எண் அல்லது மின்கடத்தாப்பொருள் மாறிலி ஆகும்.
5. திரவப்படிகங்கள் திண்மபடிகநிலைக்கும், திரவநிலைக்கும் இடைப்பட்ட ஒருநிலையாகும். இதனுடைய ஒளிப்பண்புகள் காட்சிஅமைப்புக் கருவிகளில் பயன்படுகின்றன.
6. லேசர்களும், மேசர்களும் ஒளியியல் நிகழ்ச்சியினால் ஏற்பட்டவையாகும். லேசர்கள் பலவகைகளில் உள்ளன. ஒவ்வொன்றும் ஒவ்வொரு துறையில் அதன் சிறப்பியல்புகளினால் முக்கியத்துவம் வாய்ந்ததாகத் திகழ்கிறது.
7. லேசர்கள் செய்தித்தொடர்பு, தொழிற்கூடம், மருத்துவத்துறை, ராடார், ஒலோகிராபி ஆகியவைகளில் பயன்படுகின்றன.

வினாக்கள்

1) உலோகங்கள், மின்கடத்தாப்பொருள்கள், குறைகடத்திகள் ஆகியவற்றில் நிகழும் ஒளி உட்கவருதல் பற்றி விரிவாய் எழுது.
2) திரவப்படிகங்கள் என்றால் என்ன? அவற்றின் இயலமைப்பு, ஒளிப் பண்புகள் பற்றிச் சுருக்கமாய்க் கூறுக.
3) தன்னியல் வெளியீடு, தூண்டப்பெற்ற வெளியீடு என்றால் என்ன? உதாரணங்கள் தந்து அவற்றின் வேறுபாடுகளையும் விளக்குக.
4) அமோனியா மேசரின் அமைப்பினையும் செயல்முறையையும் விளக்குக.
5) மாணிக்க லேசரின் மும்மட்டத்தை வரைந்து, அதில் லேசர் விளைவு எங்ஙனம் ஏற்படுகிறது என்பதனைக் கூறுக. மேலும், மாணிக்க லேசரைத் தொழிற்கூடத்தில் எவ்வாறு பயன்படுத்தலாம் என்பதனையும் விளக்குக.
6) ஹீலியம் - நியான் லேசரின் வடிவமைப்பைப் படம் வரைந்து அதன் செயற்படுமுறையை விளக்குக.
7) காலியம்-ஆர்சினைடு டையோடின் சிறப்பியல்புகள் பற்றி எழுதி, அவற்றில் லேசர் கதிர்வீச்சு எவ்வாறு கிடைக்கிறது என்பதையும் விளக்குக.
8) லேசரின் பயன்கள்பற்றி ஒரு விரிவான கட்டுரை எழுதுக.
9) சிறுகுறிப்பு வரைக :

   (அ) '*F*' மையங்கள் (ஆ) எக்ஸைட்டான் (இ) ஒளிர்தலும், நின்றொளிர்தலும் (ஈ) தொகைத் தலைகீழாக்கம் (உ) செய்தித் தொடர்புத்துறையில் லேசர்கள்.

மேற்கோள் நூற்பட்டியல் :

1. 'Elements of Materials Science and Engineering' – Lawrence H. Van Vlack, Addison – Wesley Publishing Company, New York, Fifth Edition, 1985.
2. 'Masers and Lasers – An Historical Approach' – Mario Bertolotti, Adam Hilger Ltd, Bristol, 1983.
3. 'Lasers and Their Applications' – M.J. Beesley, Taylor and Francis Ltd, London, 1976.
4. 'Introduction to Solid State Physics' – C. Kittel, Wiley Eastern Limited, New Delhi, Fourth Reprint, 1985.

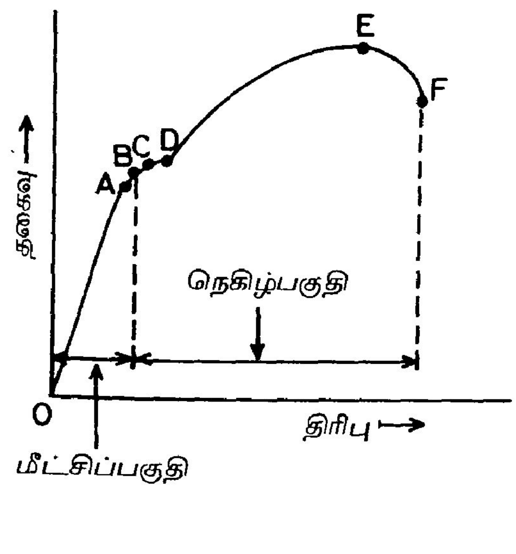
13. பொருள்களின் எந்திரப் பண்புகள்

13.1 அறிமுகம்

ஒரு பொருளின் மீது புறவிசைகள் செயற்படும்போது அப்பொருளின் நிலையை விளக்கப்பயன்படும் பண்புகளே எந்திரப்பண்புகள் (mechanical properties) எனப்படும். இப்பண்புகள் திரிபு அல்லது தகைவு அல்லது அவையிரண்டையும் சார்ந்த கணியங்கள் மூலம் விளக்கப்படுகின்றன. மீட்சித்தன்மை (elasticity), நெகிழ்தன்மை (plasticity), கடினத்தன்மை (hardness), நொறுங்குந்தன்மை (brittleness), உறுதி (strength), சரியுந்தன்மை (creep), தளர்ச்சி (fatigue), தகடாகுந்தன்மை (malleability), முரட்டுத்தன்மை (toughness), விறைப்பு (stiffness) போன்றவை முக்கிய எந்திரப்பண்புகளாகும். மேற்கூறப்பட்ட பண்புகளின் மூலம் ஒருபொருள் பல புறவிசைகளுக்கு உட்படும்போது அதன் நிலையை விளக்கலாம். எந்திரப்பண்புகள் பற்றிய ஞானம் ஒவ்வொரு பொறியாளருக்கும் மிகத் தேவைப்படுகிறது. இந்த ஞானத்தின் மூலமே ஒவ்வொரு பொறியாளரும், எந்திரத்தின் பலதரப்பட்ட உறுப்புகளுக்கு எவ்வகைப் பொருள்கள் தகுதியாய் அமையும் எனக் கூறமுடியும். இவ்வத்தியாயத்தில் சில முக்கிய எந்திரப் பண்புகளைப் பற்றிப் பார்ப்போம்.

13.2. மீட்சித்தன்மையும், நெகிழ்தன்மையும்

திண்மப்பொருள் ஒன்று தகைவிற்கு (stress) உட்படும்போது அப்பொருளில் திரிபு (strain) நேரிட்டு உருக்குலைவு (distortion) ஏற்படும். செயற்படுத்தப்பட்ட தகைவு நீக்கப்படும்பொழுது பொருள் தன் தொடக்க உருவினையும், அளவினையும் மீண்டும்



A – ஒப்பீடு எல்லை

B – மீட்சி எல்லை

C – இளகு நிலைப்புள்ளி

D – இளகுநிலைப் பகுதி

E – இறுதி வலிமை

F – உடைக்கும் தகைவு

படம் 13.1 மென் எஃகின் தகைவு-திரிபு வளைகோடு

பெறுமாயின், அப் பொருள் மீட்சிப்பொருள் என அழைக்கப்படும். இத்தன்மை, மீட்சித்தன்மை எனப்படும். சிறுதகைவு ஒன்று பொருளின் பெருமளவு உருக்குலைவினை நிகழ்த்துமாயின், அப்பொருள் நெகிழ் பொருள் (plastic) என அழைக்கப்படும். மேலும், செயற்படுத்தப்பட்ட தகைவு நீக்கப்பட்டாலும் கூட அப்பொருள் தன் தொடக்க உருவினையும், அளவினையும் பெறமுடியாது. இத்தன்மை நெகிழ் தன்மை எனப்படும். மென் எஃகு (mild steel) அல்லது குறைகரி எஃகு (low carbon steel) என்ற பொருளின் தகைவு-திரிபு வளைகோடு படம் 13.1ல் கொடுக்கப்பட்டுள்ளது. மென் எஃகு கம்பியாகுந் தன்மை (ductile) யுடையது. அதன் தகைவு-திரிபு படம் பொதுவாய் படம் 13.1ல் காட்டியுள்ளதுபோல் இருக்கும். படத்தின் முக்கியப்பகுதிகளைச் சற்றுக்காணலாம்.

ஹூக் விதிக்கு உட்பட்ட பகுதி

ஹூக் விதியின்படி மீட்சி எல்லைக்குள் ஒரு பொருளில் ஏற்படும் திரிபு அதன் மீது செயற்படும் தகைவிற்கு நேர்விகிதத்தில் இருக்கும். இந்த உண்மை படத்தில் தோற்றுவாயிலிருந்து(O), ‘A’ வரை பொருந்தும். ‘A’க்குப் பிறகு வளைகோடு, நேர்கோடு அமைப்பிலிருந்து மாறுபடுகிறது. அதனால்தான் ‘A’யை ஹூக்விதிக்கு உட்பட்ட பகுதியின் முடிவெல்லை அல்லது ஒப்பீடு எல்லை (proportional limit) என்பர். பொருள் ‘B’ வரை மீட்சித்தன்மையுடையதாயிருக்கும். ‘B’யும் ‘A’யும் பெரும்பாலும் மிக அருகில் இருக்கும். ஆனால் ‘A’லிருந்து ‘B’ வரைக்கும் உள்ள பகுதியில் தகைவிற்கும் திரிபிற்கும் உள்ள விகிதம் நேர்விகிதமாயிராது. அதனால் இவ்விரு புள்ளிகளுக்கும் இடையே உள்ள தூரம் படத்தில் நேர்கோடாய் இல்லை.

மீட்சி எல்லை (elastic limit)

‘மீட்சி எல்லை’ என்பது படத்தில் ‘B’ என்ற புள்ளியிலுள்ள தகைவின் மதிப்பாகும். அத்தகைவுவரை பொருள் முழுமையாய் மீட்சித்தன்மை உடையதாயிருக்கும். மீட்சி எல்லைக்குமேல் தகைவினால் ஏற்படும் நீட்சி, நிலையாய்ப் பொருளில் இருந்துவிடும். இதனை நிலையான உருக்குலைவு அல்லது விகார நிலைப்பு (permanent set) என்பர்.

இளகுநிலைப் புள்ளி (yield point)

மீட்சி எல்லைக்குச் சிறிது மேலே இளகுநிலைப் புள்ளி உள்ளது. குறிப்பிட்ட புள்ளியில் தகைவினை உயர்த்தாமல் திரிபு அதிகரித்துக்கொண்டே போகுமானால் அப்புள்ளி இளகுநிலைப் புள்ளி எனப்படும். படத்தில் இளகு நிலைப்புள்ளி ‘C’யில் உள்ளது. இளகுநிலை உறுதி (yield strength) என்பது ‘C’யில் உள்ள தகைவின் மதிப்பாகும். அப்புள்ளியில் தகைவை மேலும் கூட்டாமலே நிலையான திரிபு பொருளில் ஏற்படும். படத்தில் ‘C’ யிலிருந்து ‘D’ வரைக்கும் ஒரே மட்டக்கோடு உள்ளது. இளகு நிலைப்பகுதியில் பொருளின் அணுக்கள் அல்லது மூலக்கூறுகள் அணிக்கோவையில் தங்கள் இருப்பிடத்தைச் சிறிது மாற்றியமைப்பதின் மூலம் செலுத்தப்படும் விசைக்கு எதிராய் அதிக தகைவை ஏற்படுத்தி விசையின் விளைவைக் குறைக்கும். அஃதாவது, தகைவும், திரிபும் நேர்விகிதத்தில் இராது.

இறுதி வலிமை (ultimate strength)

இறுதிவலிமை என்பது பொருளில் முறிவு ஏற்படாமல், அதனுள் ஏற்படும் பெருமத்தகைவினைக் குறிக்கும். படத்தில் 'E' என்ற புள்ளி பெருமத்தகைவினைக் குறிக்கிறது. 'E' வரைக்கும் சோதனைக்கு எடுத்துக் கொள்ளப்பட்ட துண்டின் குறுக்குப் பரப்பில் சீரான குறைவு இருந்து கொண்டுவரும். 'E'க்குப்பிறகு துண்டின் நடுப்பகுதி மிகவும் மெல்லியதாய்க் காணப்படும். உடனே துண்டில் முறிவு (fracture) அந்த மெல்லிய நடுப்பகுதியில் நடக்கும்.

உடைக்கும் தகைவு (breaking stress)

படத்தில் 'F' என்ற புள்ளியில் உள்ள தகைவே உடைக்கும் தகைவு ஆகும். நடைமுறையில் இதற்கு முக்கியத்துவம் இல்லையென்றாலும், 'F' என்ற புள்ளியின் இருப்பிடம் பொருளின் மொத்த நீட்சியைக் கண்டுபிடிக்க உதவுகிறது. உடைக்கும் தகைவின் மதிப்பு இறுதி வலிமைத் தகைவின் மதிப்பைவிடக் குறைவாயிருக்கும். ஏனெனில் பொருளில் முறிவு விரிவடைந்து கொண்டே போவதால், செயற்படும் பளுவினைவிடக் குறைந்ததகைவே உருவாகிறது.

வார்ப்பு இரும்பு, உயர்கரி எஃகு, உலோகக் கலவை உருக்குகள் போன்றவற்றின் தகைவு-திரிபு படங்களில் மீட்சி எல்லை, நெகிழ்புள்ளி ஆகியவற்றைக் கண்டுபிடிப்பது அரிது. ஏனெனில், படத்தில் அவற்றிற்குரிய இடங்களில் கிடைமட்டக் கோட்டிற்குப் பதிலாய் ஏறுமுனையில் உள்ள சீரான நேர்கோடே காணப்படும். இப்படத்திலிருந்து யங்குணகம் (Young's modulus), சராசரி நீட்சி, மீட்சி எல்லை ஆகியவற்றைக் கண்டுபிடித்துப் பொருளின் மீட்சித்தன்மை, நெகிழ்தன்மை போன்ற பண்புகளைத் தெளிவாய் அறியலாம்.

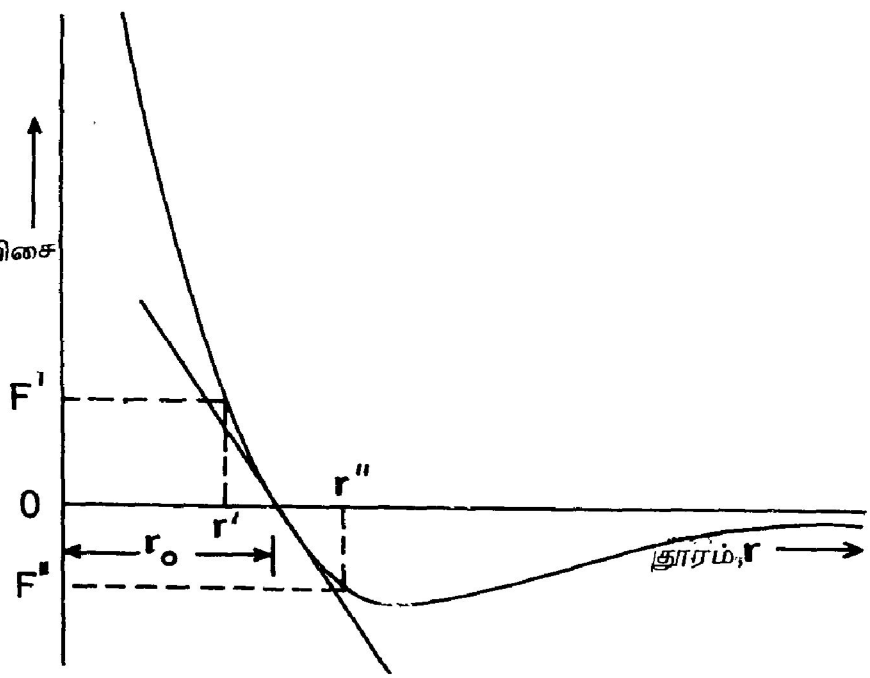
13.3 *யங்குணகம் (அணுக்கொள்கையின் மூலம் விளக்கம்)*

ஈரணுக்களுக்கு இடையே உள்ள நிலை ஆற்றல்

$$V(r) = \frac{-a}{r^n} + \frac{b}{r^m} \tag{2.1}$$

இங்கு a, b, n, m மாறிலிகள் ஆகும். மேலும் m>n. இச்சமன்பாட்டின் முதற்பகுதி ஈர்ப்பு ஆற்றலைக் குறிக்கிறது. இரண்டாம் பகுதி எதிர்ப்பு ஆற்றலைக் குறிக்கிறது. இவ்வாற்றல்களைப் பற்றி அத்தியாயம் இரண்டில் விரிவாய்க் கண்டோம். படம் 13.2 இல் அணுஇடை விசை,

$$F = \frac{-dV}{dr} \tag{2.2}$$



படம் 13.2 அணுஇடைவிசை - தூர வளைகோடு

அணுஇடைச் சமநிலைத்தூரத்தில் (r_0) நிலை ஆற்றல் சிறுமமாயும், அணு இடைவிசை சுழியாயும் இருக்கும். அணுஇடைத்தூரத்தை, r_0 லிருந்து 'r' என்ற தூரத்திற்கு அதிகப்படுத்துவதாகக் கொள்வோம். இவ்வாறு அதிகப்படுத்துதற்காக ஒரு புறவிசை '$F'_{புற}$ - யை நாம் எடுத்துக்கொண்ட அமைப்பில் செலுத்த வேண்டும். இங்கு '$F'_{புற}$' என்பது அணுஇடைவிசைக்குச் சமமாயும் ஆனால், எதிர்த்திசையில் உள்ளதாயும் இருக்கும். அதனால்,

$$'F_{புற} = -F = \frac{dV}{dr}$$

படம் 13.2 இன் படி அணு இடைத்தூரத்தை r_0 லிருந்து r'க்குக் குறைக்க ஓர்இறுக்கவிசை (compressive force) F'–ஐ செயற்படுத்த வேண்டும். அதே சமயம் r_0 லிருந்து r'' என்ற தூரத்திற்கு உயர்த்த இழுவிசை (tensile force) F''ஐ செயற்படுத்த வேண்டும். r_0 இல் அணுஇடைவிசை - தூர வளைகோட்டிற்கு வரையப்பட்ட தொடுகோடு (tangent) நடைமுறையில் r_0-ன் இருபுறமும் உள்ள சிறிய இடப்பெயர்ச்சி நெடுக்கத்தில் மேற்பொருந்தியிருக்கும். நொறுங்குந்தன்மையுள்ள பொருள்களிலும், கம்பியாகுந்தன்மையுள்ள பொருள்களிலும் மீட்சி எல்லையில் ஏற்படும் திரிபின் அளவு

0.001 லிருந்து 0.005 வரை இருக்கும். இத்திரிபின் நெடுக்கம் மேற்கூறிய சிறிய இடப்பெயர்ச்சி நெடுக்கத்தில்தான் இருக்கிறது. எனவே அணுஇடைவிசை-தூர வளைகோட்டின் எதிர்க்குறியுடன் கூடிய சாய்வு யங்குணகத்திற்கு நேர்விகிதத்தில் இருக்கும். அஃதாவது,

$$\text{யங்குணகம் } `Y' \propto \left(\frac{-dF}{dr}\right)_{r=r_o} = \left(\frac{d^2V}{dr^2}\right)_{r=r_o}$$

$$\text{அஃதாவது}, Y = \frac{\text{தகைவு}}{\text{திரிபு}} = \frac{-dF/r_o^2}{dr/r_o}$$

$$\therefore \text{ யங்குணகம் } = \frac{1}{r_o}\left[\frac{d^2V}{dr^2}\right]_{r=r_o}$$

அதனால் வலிமையுள்ள அணுஇடைப் பிணைப்புகளை உடைய பொருள்கள் ஆழமான நிலைஆற்றல் கிணற்றைக் கூர்மையான வளைவுடன் (curvature) கொண்டுள்ளன. அதனால் வலிமையான அணுஇடைப் பிணைப்புகள், மீட்சிக்குணகத்திற்கு அதிக மதிப்புகளைத் தருகின்றன. அதேசமயம் ஆழமில்லாத நிலைஆற்றல் கிணற்றைக் கொண்ட வலிமை இல்லா அணுஇடைப் பிணைப்புகளை உடைய பொருள்களின் மீட்சிக் குணக மதிப்பு மிகக் குறைவாயிருக்கும். உதாரணமாக வைரத்தில் வலிமை வாய்ந்த சக பிணைப்பு உள்ளதால் அதன் யங்குணகம் 114×10^{10} நியூட்டன்/மீ^{2} என்னும் மதிப்பில் உள்ளது. ஆனால், கிராபைட்டினுடைய இருபரிமாண அணுத்தகடுகள் வலிமையற்ற வான்டெர்வால்ஸ் பிணைப்பால் பிணைக்கப்பட்டுள்ளன. அதனால் அதன் யங்குணகம் 8×10^9 நியூட்டன்/மீ^{2} என்னும் குறைந்த மதிப்பில் உள்ளது. (கிராபைட்டிற்குக் கொடுக்கப்பட்டுள்ள யங்குணக மதிப்பு அதன் சராசரி மதிப்பாகும்). உலோகங்களில் பெயர்வு உலோகங்கள், கார உலோகங்களை விட மிகுதியான மீட்சிக் குணகங்களைப் பெற்றுள்ளன. இதற்குக் காரணம் அவற்றின் அணுஇடைப் பிணைப்புகள் சிறிது சக பிணைப்பு இயல்பைக் கொண்டுள்ளன. வெப்ப ஆற்றல் அதிகமாகும்போது அணுஇடைப் பிணைப்புகளின் வலிமை குறைகிறது. இச்செய்கை வெப்ப உயர்வின் காரணமாய் மீட்சிக்குணக மதிப்புக்குறைவதைப் பிரதிபலிக்கிறது. பெரும்பான்மையான நேர்வுகளில் ஒருபொருளைச் சுழி கெல்வின் வெப்பநிலையிலிருந்து அதன் உருகுநிலை வரை வெப்பப்படுத்தும்போது யங்குணகத்தின் மதிப்பு 10 முதல் 20 விழுக்காடுகள் வரை குறைகிறது. வைரம் போன்ற பொருள்களில் அதிக யங்குணகம் இருந்தாலும் அவை பொறியியல் வேலைகளுக்குப்பயன்படா. ஏனெனில், அவை அதிக விலையும், நொறுங்குந் தன்மையும் உடையன. மேலும், அவை அதிக அளவில் கிடைப்பதில்லை. கம்பியாகுந்தன்மையுள்ள பொருள்களான உலோகங்கள் எந்திரத்தின் கட்டுமான உறுப்புகளுக்கு மிகவும் பயன்படுகின்றன. அதிலும் முதல் பெயர்வுத் தொகுதியிலுள்ள தனிம உலோகங்கள் தேவையான யங்குணகத்தையும் ($\sim 20 \times 10^{10}$ நியூட்டன்/மீ^{2}), தேவையான அளவு கம்பியாகுந்தன்மையும், அடர்த்தியும் கொண்டுள்ளன. ஆனால்,

இரண்டாம், மூன்றாம் பெயர்வுத் தொகுதிகளிலுள்ள உலோகங்கள் அதிகமான யங்குணக மதிப்பைக் கொண்டிருந்தாலும் அதிக அடர்த்தியை உடையனவாயிருப்பதால் அவற்றை எந்திர வேலைகளுக்குப் பயன்படுத்தமுடியாது. தனி உலோகங்களைப் பயன்படுத்துவதைவிட மிக அதிக மதிப்புள்ள யங்குணகத்தை உடைய உலோகக் கலவைகளைப் பயன்படுத்துதல், நலம் தரும் செய்கையாகும். அயனித்திண்மப் பொருள்கள் அதிக யங்குணக மதிப்பைப் பெற்றிருந்தாலும் அவற்றைக் கம்பியாய் நீட்ட முடியாது. அதனால் அவற்றையும் பொறியியல் வேலைகளுக்குப் பயன்படுத்த முடியாது. நெகிழ்த் தன்மை வாய்ந்த பாலிமர்கள் அதிக விறைப்புத் தேவையுள்ள வேலைகளுக்குப் பயன்படாது. இவை இரண்டாம்தர பிணைப்புகளால் பிணைக்கப்பட்டிருப்பதால், குறைந்த மதிப்புள்ள யங்குணகத்தைப் பெற்றுள்ளன. கலப்பு இனப் பொருள்களில் (composite materials) சில, அதிக அளவு யங்குணக மதிப்பினையும், அதே சமயம் குறைந்த அடர்த்தியையும் கொண்டுள்ளன. உதாரணமாய் 40 விழுக்காடுகள் (பருமனில்) போரானும், 60 விழுக்காடுகள் (பருமனில்) அலுமினியமும் சேர்ந்த ஒரு கலப்பு இனப் பொருளின் யங்குணகம் 21.9×10^{10} நியூட்டன்/மீ^{2} ஆகும். மேலும், இஃது எஃகினைப் போன்று விறைப்பாயும் அதேசமயம் குறைந்த அடர்த்தியை உடையதாயும் உள்ளது.

13.4. உலோகங்களின் உருமாற்றம் (Deformation of metals)

புறவிசை ஒன்று, பொருளின்மீது செயற்படும்போது அதன் உருவில் அல்லது வடிவில் ஏற்படும் மாற்றமே **உருமாற்றம்** எனப்படும். உருமாற்றம் ஒருபொருளின் நீளத்தில் குறைவினையோ, உயர்வினையோ உண்டாக்கினால் அது நீளவாட்டு உருமாற்றம் (longitudinal deformation) எனப்படும். அதே சமயம் உருவத்தின் பலமுகங்களுக்கும் இடையே உள்ள கோணங்களை மாற்றினால் அது கோண உருமாற்றம் (angular deformation) எனப்படும். ஒரு பொருளின் மொத்த உருமாற்றம், அதன் பருமனில் மாற்றத்தையும் (அஃதாவது, அடர்த்தியில் மாற்றம்), அதன் தொடக்க நிலையில் மாற்றத்தையும் (அஃதாவது, உருக்குலைவு) கொண்டது. உலோகங்களில் இருவிதமான உருமாற்றங்கள் உள்ளன.

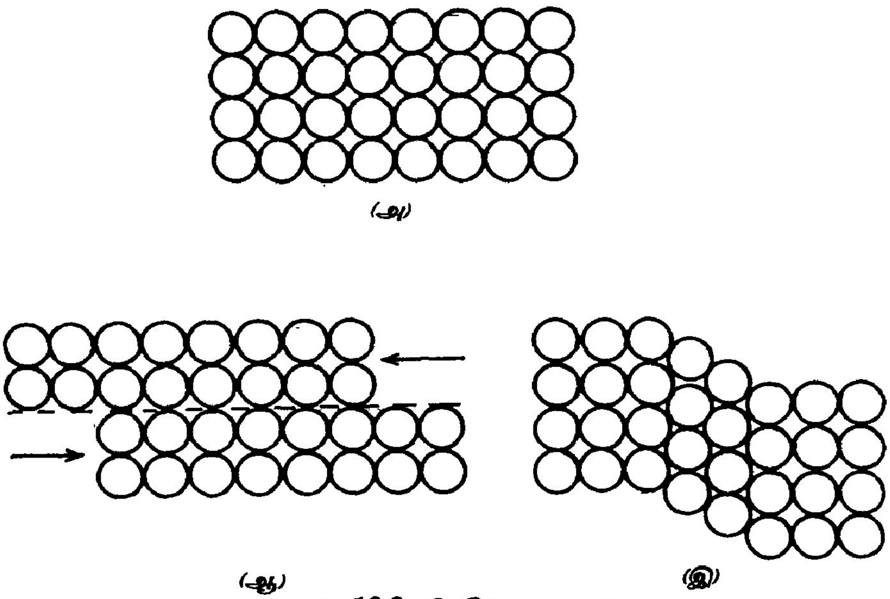
(அ) மீட்சி உருமாற்றம் (Elastic deformation)

(ஆ) நெகிழ் உருமாற்றம் (Plastic deformation)

மீட்சி உருமாற்றத்தில் ஏற்படும் உருமாற்றம் தற்காலிகமானது. அஃதாவது, பொருளின் மீது செயற்படும் புறவிசையை நீக்கிவிட்டால் மீட்சி உருமாற்றம் மறைந்து, பொருள் தொடக்க நிலைக்கு வந்துவிடும். ஒருபொருளில் மீட்சி உருமாற்றம் நெகிழ் உருமாற்றத்திற்கு முன்பு நடக்கிறது. உலோகத்தில் அணிக்கோவையில் இறுக்க விசை செயற்படும்போது அதன் அலகு செல்லின் அளவு இறுக்கவிசைத் திசையில் குறைகிறது. அதேபோல் இழுவிசை செயல்படும்போது அலகு செல்லின் அளவு இழுவிசைத் திசையில் கூடுகிறது. அதனால் இழுவிசையின்போது அணு இடைத்தூரம் கூடும். இதனால் மீட்சிக்குணக மதிப்புக் குறைகிறது. இறுக்க விசையின் போது அணுஇடைத்தூரம் குறையும். இதனால், மீட்சிக்குணக மதிப்பு உயர்கிறது. பக்கவாட்டுத் திரிபிற்கும் (lateral

strain), நேர்த்திரிபிற்கும் (longitudinal strain) உள்ள விகிதம் பாய்சான் விகிதமாகும் (Poisson's ratio). உலோகங்களுக்கு அதன் மதிப்பு 0.25 முதல் 0.33 வரை உள்ளது.

நெகிழ் உருமாற்றத்தில் ஏற்படும் உருமாற்றம் நிலையானது. அஃதாவது, பொருளின் மீது செயற்படும் புறவிசையை நீக்கிவிட்டாற்கூட உருமாற்றம் மறையாது. இவ்வுருமாற்றம் நிகழப் பொருளின் நெகிழ் வலிமையைவிட அதிகமான தகைவுகள் தேவை. அநேக உலோகங்கள் சறுக்குப் பெயர்ச்சித் தகைவுகளின் செயற்பாட்டினால் நெகிழ் சறுக்குப் பெயர்ச்சி (Plastic shear) அல்லது நழுவலை (slip)க் கொண்டுள்ளன. நழுவல் நிகழ்ச்சியில், ஓர் உலோகப் படிகதளம் அதன் மற்றொரு படிகத் தளத்தின் மீது நழுவுகிறது. மேலும் நழுவல் நிலையான இடப்பெயர்ச்சியைத் தோற்றுவிக்கிறது. அஃதாவது, சறுக்குப் பெயர்ச்சித் தகைவை நீக்கிவிட்டாற்கூட, அதனால் தோற்றுவிக்கப்பட்ட இடப்பெயர்ச்சி நிலையாயிருக்கும். எனினும், இந்த நழுவல் நிகழ்ச்சி மூலம், நெகிழ் உருமாற்றத்தை ஏற்படுத்தவும், கம்பியாகுந்தன்மையும் கொண்ட பொருள்களைக் கடினப்படுத்தவும் உறுதிப்படுத்தவும் முடியும். நழுவலை நெகிழ்உருமாற்றத்தின் முதல்பாணி என்று கொண்டால், அதன் இரண்டாம்பாணி முறுக்கல் (twinning) ஆகும். முறுக்கல் அணிக்கோவையின் ஒருபகுதி முகப்புநிலையை அதன் மறுபகுதிக்கு ஏற்றவாறு மாற்றுகிறது. இங்கு ஓர் அணுவின் சார்பு இடப்பெயர்ச்சி ஒரு அணு இடைத்தூரத்திற்கும் மிகக் குறைவாயிருக்கும். ஆனால், நழுவல் நிகழ்ச்சியில் அணுக்கள் பல அணுஇடைத்தூரங்கள் இடம்பெயர்கின்றன. மேலும், நழுவல் நிகழ்ச்சி பெரும்பாலும் சாதாரண வெப்பநிலைகளிலும் உயர் வெப்பநிலைகளிலும் நடைபெறும். ஆனால், முறுக்கல் நிகழ்ச்சி குறைந்த வெப்பநிலைகளில் மட்டும் நடைபெறும். படம் 13.3 (அ) வில் குறைபாடு இல்லா நிறைவான ஓர் இருபரிமாண அணிக்கோவை



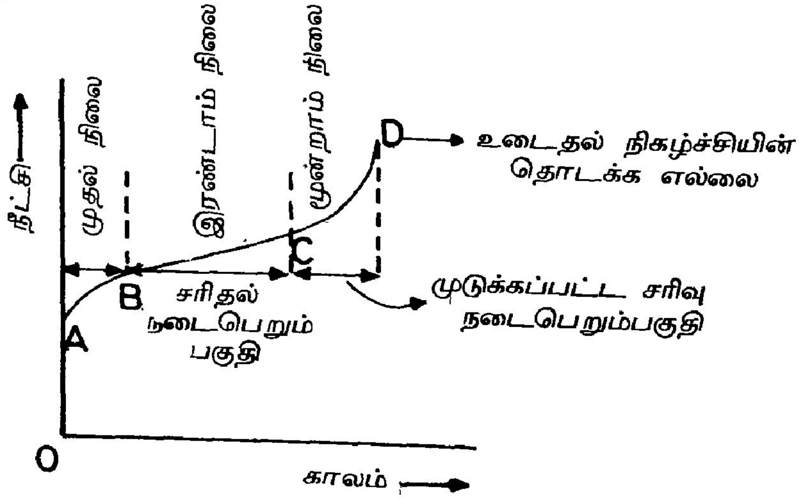
படம் 13.3 நெகிழ் உருமாற்றம்

காட்டப்பட்டுள்ளது. நழுவல் நிகழ்ச்சியின்போது அணுத் தளங்கள் எவ்வாறு நகர்கின்றன என்பதனைப் படம் 13.3 (ஆ) காட்டுகிறது. அதேபோல் முறுக்கல் நிகழ்ச்சியின் போது அணிக்கோவையின் முகப்புநிலை எவ்வாறு மாறுகிறது என்பதனைப் படம் 13.3 (இ) காட்டுகிறது.

கம்பியாகுந்தன்மையுள்ள பொருள்களில் முதல் உருமாற்றம் மீட்சி உருமாற்றமாயிருக்கும். அடுத்துத் தகைவைக் கூட்ட நெகிழ் உருமாற்றம் நடைபெறும். மேலும், தகைவைக் கூட்ட அப்பொருள் கடைசி நிலையான 'உடைதல்' நிகழ்ச்சிக்கு ஆளாகும். நெகிழ் உருமாற்றத்தில் நிலையான மாற்றம் இருந்தாலும் பொருளின் அணிக்கோவையில் தொடர்ச்சியிருக்கும். (படம் 13.3 (ஆ), 13.3 (இ)) ஆனால், உடைதல் நிகழ்ச்சியின் போது உருமாற்றமும், அணிக்கோவையில் தொடர்ச்சியின்மையும் ஏற்படும்.

13.5 *சரிதல்* (Creep)

நிலையான புறவிசை ஒருபொருளில் செயல்படும்போது அப்பொருளில் ஏற்படும் தொடர்ச்சியான உருமாற்றம் '*சரிதல்*' எனப்படும். இந்த நெகிழ்தன்மை உடையும் புள்ளிவரைகூட நடக்கலாம். இக்குணம் இரும்பு, நிக்கல், தாமிரம், அவற்றினுடைய உலோகக் கலவைகள் போன்றவற்றிற்கு உயர்வெப்பநிலைகளிலும், துத்தநாகம், வெள்ளீயம், காரீயம், அவற்றினுடைய உலோகக் கலவைகள் போன்றவற்றிற்கு அறை வெப்பநிலையிலும் நிகழ்கிறது. நெகிழ் தன்மையுள்ள பிளாஸ்டிக்குகளும், இரப்பர்களும் சரிதல் நிகழ்ச்சிக்கு அதிக நுண்மை (sensitive) கொண்டவை. உலோகங்களில் நெகிழ்உருமாற்றம் மூலம் சரிதல் நடைபெறுகிறது. அந்த நெகிழ் உருமாற்றம் உலோகதனிப்படிகங்களின் படிகத் திசைகளில் நடைபெறும் நழுவல் நிகழ்ச்சிமூலம் ஏற்படுகிறது. புறவிசையை நீக்கிவிட்டாற்கூட இச்சரிதல் நடைபெற்ற பகுதிகளில் உள்ள உருக்குலைவுகள் மறையா. படம் 13.4ல் சரிதல் நிகழ்ச்சிக்குரிய வளைகோடு காண்பிக்கப்பட்டுள்ளது.



படம் 13.4 உயர் வெப்பநிலைகளில் நடைபெறும் சரிதல் நிகழ்ச்சிக்குரிய வளைகோடு.

படத்தில் உள்ள வளைகோடு புறவிசையின் கண் உள்ள ஓர் உலோகத்தில் ஏற்படும் நீட்சிக்கும், நேரத்திற்கும் இடையே வரையப்பட்டதாகும். அவ்வளைகோட்டில் மூன்று பகுதிகள் உள்ளன. முதல் பகுதி ABயை முதல்நிலை என்பர். இங்குக்குறைந்த நேரத்தில் அதிக நீட்சி இருக்கும். இரண்டாம் நிலையில் (BC) சரிதல் நிகழ்கிறது. பொருளின் வாழ்வு நேரத்தை BCயின் நெடுக்கம் முடிவு செய்கிறது. BCயின் சாய்வு ஒரு குறிப்பிட்ட வெப்பநிலையில் ஒருகுறிப்பிட்ட தகைவுக்கு ஏற்படும் நீட்சி வீதத்தைக் குறிக்கிறது. இழுவிசை குறைந்தால் BCயின் சாய்வு குறையும். BC பகுதியில் உள்ள சரிதல் பற்றிய குறிப்புகள் பொறியியல் வடிவமைப்பிற்கு மிகவும் பயன்படும். நீராவிச் சுழலி (steam turbine)யின் இயங்கும் உறுப்புகளின் வடிவமைப்பு அமைக்கப்படும்போது அவற்றில் சரிதல் நூறாயிரம் மணிகளில் (அதாவது பதினொரு வருடங்களில்) ஒரு விழுக்காட்டிற்கு மிகாமல் இருக்குமாறு பார்த்துக்கொள்ள வேண்டும். அதேபோல் நீராவிக் குழாய்களிலும், கொதிகலனுக்குரிய குழாய்களிலும் சரிதல் பத்தாயிரம் மணிகளில் ஒரு விழுக்காட்டிற்கு மிகாமல் இருக்க வேண்டும். மேலும், சரிதல் நிகழ்ச்சிக்கு மிகுந்த தடை அளிக்கும் பொருள்கள் பற்றி இந்நூலில் பொருள்களின் வெப்பப் பண்புகள் பற்றிய அத்தியாயத்தின் ஒருபகுதியான உயர்வெப்பநிலைப் பொருள்களில் விரிவாய்க் கூறப்பட்டுள்ளது. வளைகோட்டின் மூன்றாம் நிலையான CDயில் முடுக்கப்பட்ட சரிதல் நிகழும். இதன் முடிவில் பொருளில் பிளவு ஏற்படும்; அல்லது அப்பொருள் உடையும். பெரும்பாலும் உலோகக்கலவைகளை இம்மூன்றாம் நிலையில் பயன்படுத்தக்கூடாது. பொதுவாய், வெப்பநிலை உயரஉயரச் சரிதலுக்குரிய தடை குறைந்துகொண்டே வருகிறது. கரி எஃகை விட 18 விழுக்காடுகள் குரோமியமும், 8 விழுக்காடுகள் நிக்கலும் கலக்கப்பட்ட எஃகினில் சரிதலுக்குரிய தடை உயர் வெப்பநிலையிலும் ($\sim 800°C$) மிக அதிக மதிப்பினை உடையதாயுள்ளது.

13.6 உலோகங்களின் தளர்ச்சி (Fatigue)

திரும்பத் திரும்பத் தகைவிற்கு உட்படும் ஒருபொருளில் தகைவை நீக்கினாற்கூட அது தொடக்க நிலைக்கு வர முடியாது. இந்நிலையே அப்பொருளின் **தளர்ச்சி**எனப்படும். ஒருபொருளில் பலமுறை தகைவினை விட்டு விட்டு செயற்படுத்தியும், அஃது, ஒவ்வொரு முறையும் தகைவினை நீக்கும்போது, தொடக்க நிலையை மாற்றம் ஏதுமில்லாமல் பெறுமானால், அவ்வாறு செயற்படுத்தப்படும் பெருமத் தகைவிற்குத் தளர்ச்சி எல்லை (Fatigue limit) என்பர். பெரும்பாலும் தளர்ச்சி, ஏற்ற-இறக்கத் தகைவு செயற்படும்போது ஏற்படுகிறது. எந்திரங்களில் உள்ள எஃகு பகுதிகளில் தளர்ச்சி, பின்வரும் காரணங்களால் ஏற்படுகிறது :

(1) மிகுந்த வேற்றுப் பொருள் கலப்பு.

(2) வெப்பப்பதனிடல், தண்செயல் (cold working) போன்றவற்றால் பொருளினுள் ஏற்படும் மாற்றங்கள்.

(3) துளைகளிலும், வரிப்பள்ளங்களிலும் மிகுந்து இருக்கும் தகைவுகள்.

(4) கீறல்கள் போன்ற பரப்புக்குறைபாடுகள்.

(5) இரு எந்திரப் பகுதிகளுக்கு இடையே ஏற்படும் ஆக்ஸிஜனேற்றம்.

(6) உலோகத்தின் துகள் அல்லது மணி (grain)யின் அளவு.

மேற்கூறப்பட்ட காரணிகளைக் கட்டுப்படுத்துவதனால் உலோகங்களில் தளர்ச்சி ஏற்படுதலைக் குறைக்கலாம்.

13.7 வெப்பப்பதனிடல் செய்முறைகளால் உலோகங்களில் ஏற்படும் மாற்றங்கள்

ஓர் உலோகத்திலோ, உலோகக்கலவையிலோ தேவையான நிலைகள், பண்புகள் கிடைப்பதற்காக அதனைக் கட்டுப்படுத்திய முறையில் வெப்பப்படுத்தல், குளிர்ப்படுத்தல் போன்ற செய்கைகளுக்கு அல்லது செய்கைகளின் கலப்பிற்கு வெப்பப்பதனிடல் (heat treatment) என்று பெயர். ஆற்றிப்பதனிடல் (annealing), கடினப்படுத்தல் (hardening), வேகமாய்க் குளிர்ப்படுத்தல் (quenching), புறக்கடினப்படுத்தல் (case hardening), வீழ்படிவின்மூலம் கடினப்படுத்துதல் (precipitation hardening), விறைப்பாக்குதல், (tempering), கோளகப்படுத்துதல் (spheroidizing) போன்றவை முக்கிய வெப்பப்பதனிடல் முறைகளாகும்.

பல வெப்பப் பதனிடல் முறைகளால் கீழ்க்கண்ட விளைவுகள் உலோகங்கள் அல்லது உலோகக்கலவைகளில் ஏற்படும்:

(1) உலோகத்தின் நுண் இயலமைப்பில் (microstructure) மாற்றம் ஏற்படுகிறது.

(2) உலோகம் மென்மையாக்கப்படும்; இதனால் அதன் இயந்திர வேலைக்கேற்ற தனமை (machainability) உயர்த்தப்படுகிறது (ஆற்றிப்பதனிடல்).

(3) உலோக வார்ப்புகளில் உள்ள வாயுக்கள் வெளியேற்றப்படுகின்றன (ஆற்றிப்பதனிடல்).

(4) ஓர் உலோகத்தில் தண்செயல்மூலம் ஏற்பட்ட உள்தகைவுகள் நீக்கப்படுதலோடு அதன் கம்பியாகுந்தன்மையும் உயர்த்தப்படுகிறது (ஆற்றிப்பதனிடல்).

(5) உலோகத்தின் கடினத்தன்மை உயர்த்தப்படுகிறது (வேகமாய்க் குளிர்ப்படுத்தல்).

(6) உலோகத்தின் கடினத்தன்மையும், உறுதியும் உயர்த்தப்படுகின்றன (வீழ்படிவின்மூலம் கடினப்படுத்துதல்).

(7) தண்செயலுக்கு உள்ளான உலோகத்தின் மின்கடத்துந் தன்மை திரும்பப் பெறப்படுகிறது(ஆற்றிப்பதனிடல்).

(8) நிலைகாந்தம் தயாரிப்பதற்காக எஃகின் காந்தப்பண்பு உயர்த்தப்படுகிறது (கடினப்படுத்துதல்).

(9) உலோகத்தில் வெப்பச் செயலின் (hot working) போது அதன் துகள் இயலமைப்பில் ஏற்பட்ட மாற்றம் சமன் செய்யப்படுகிறது (இயல்பாக்குதல் (normalising) அல்லது ஆற்றிப்பதனிடல்).

(10) கடினப்படுத்தலின்போது எஃகில் ஏற்படும் நொறுங்குந்தன்மையை நீக்கி, முரட்டுத் தன்மை உயர்த்தப்படுகிறது (விறைப்பாக்குதல்).

(11) ஓர் எஃகுத் துண்டின் மீது கடினமானதும், தேய்மானத்தடை உள்ளதுமான ஒருபரப்புத்தோற்றுவிக்கப்படுகிறது(புறக்கடினப்படுத்தல்).

(12) ஓர் உயர் கரி எஃகில் மென்மைத்தன்மையும், ஒடியாத்தன்மையும் ஏற்படுகின்றன (கோளகப்படுத்தல்).

(13) முந்தைய வெப்பப்பதனிடல் முறைகளில் ஏற்பட்டச் சிலகுறைபாடுகள் நீக்கப்படுகின்றன(இயல்பாக்குதல்).

13.8 முக்கியத் தொழில் நுட்பவியல் பண்புகள்

ஓர் உலோகம் பல்வேறு தொழில் நுட்ப செயற்பாடுகளுக்கும், செய்முறைகளுக்கும் (processes) பொருந்திவருகிறதா என்பதனை முடிவுசெய்யும் பண்புகளே "தொழில் நுட்பவியல் பண்புகள்" ஆகும். அவற்றில் இயந்திர வேலைக்கேற்ற தன்மை அல்லது கடைசல் தன்மை (machinability), உருக்கி இணைக்குந்தன்மை (weldability), பல உருவ அமைப்புகளை உருவாக்க நெகிழ்ந்து கொடுக்கும் தன்மையான வடிவமாகுந்தன்மை (workability or formability), வார்ப்பிற்கேற்ற தன்மை (castability) ஆகியவை முக்கியமானவையாகும்.

(அ) இயந்திர வேலைக்கேற்ற தன்மை

எந்திர உறுப்புகள் செய்யும்போது ஒருபொருளைப்பல உருவ அளவுகளில் எளிதாய் வெட்டவோ, அதன்பரப்பினை எளிதாய்ச் சமப்படுத்தவோ முடியுமானால் அப்பொருளை இயந்திர வேலைக்கேற்ற பொருள் எனக் கூறலாம். மேலும், பொருளை வெட்டப் பயன்படும் கருவிகளின் வாழ்நாள், வெட்டுதற்குச் செலவிடும் திறன், பொருளின் சில பகுதிகளை நீக்க ஆகும் செலவு போன்றவற்றாலும் பொருளின் இயந்திர வேலைக்கேற்ற தன்மை முடிவுசெய்யப்படும். பொருளின் அமைப்பு, கடினத் தன்மை, படிகத்துகள் அளவு, நுண் இயலமைப்பு, அளவு, குளிர்ப்படுத்தும் வீதம், வெட்டின் ஆழம், வெட்டும் கருவியின் அமைப்பு மற்றும் வகை போன்றவை, ஒரு பொருளின் இயந்திர வேலைக்கேற்ற தன்மையின் மதிப்பினை மாற்றுகின்றன. சில தனிமங்களை மிகச்சிறு விழுக்காடுகளில் பொருள்களில் சேர்க்கும்போது பொருள்களின் இயந்திர வேலைக்கேற்ற தன்மை மிகுதிப்படுத்தப்படுகிறது. உதாரணமாய், காரீயம், செலினியம் போன்றவற்றைத் தாமிரம், பித்தளை, வெண்கலம், நிக்கல் - வெள்ளி (nickel - silver) ஆகியவற்றில் சிறிது சேர்க்கப்படுவதால் மேற்கூறிய உலோகம் மற்றும் உலோகக்கலவைகளின் இயந்திர வேலைக்கேற்றத் தன்மையின் மதிப்பு மிகுதியாகிறது. அதேபோல் எஃகினில் 0.3% கந்தகம் சேர்க்கப்படுதலும் இதற்காகவே. துருப்பிடிக்காத எஃகினில் செலினியம், டெலூரியம், கந்தகம் ஆகியவை சேர்க்கப்படுகின்றன. சில எஃகுகளில் மங்கனீசு, பாஸ்பரசு ஆகியவை சேர்க்கப்படுகின்றன. சாம்பல் நிற இரும்பில் வெள்ளை வார்ப்பு இரும்பினை விட இயந்திர வேலைக்கேற்ற தன்மை மிகுந்துள்ளது. ஏனெனில், சாம்பல்நிற இரும்பில் தன்னிச்சையான உருவில் கரி, கிராபைட் நுண்தகடுகளாய் இருக்கிறது. இவை இயந்திர வேலையின் போது சீவல்களாக (chips) உடைத்து எடுக்க உதவுகின்றன. மேலும், வெட்டும் கருவியின் செயற்பாட்டின்போது கிராபைட் உராய்வை நீக்கும் உயவுப்

பொருளாய் (lubricant) விளங்குகிறது. ஆனால், வெள்ளை வார்ப்பிரும்பில் தன்னிச்சையான கார்பைடுகள் உள்ளன. இவை கடின உறுப்புகளாய் உள்ளமையால், இயந்திர வேலைக்கு வெள்ளை வார்ப்பிரும்பு ஒத்து வராது.

(ஆ) உருக்கி இணைக்குந்தன்மை

பல உருக்கி இணைக்கும் செய்முறைகளின்போது ஓர்உலோகத்தின் துண்டுகளை எளிதாய் உருக்கி இணைக்க முடிந்தால் அவ்வுலோகம் அதிக உருக்கி இணைக்குந்தன்மையைப் பெற்றுள்ளது எனக்கூறலாம். பலவகைப்பட்ட இயலமைப்புகளை உருவாக்க இப்பண்பு மிக அவசியமாகிறது. ஓர் உலோகத்தில் உருக்கி இணைக்குந்தன்மை அதன் அமைப்பு, வெப்பப் பண்புகள், நொறுங்குந்தன்மை, உயர்வெப்பநிலைகளிலும் நல்லுறுதி, உருக்கி இணைப்பு நடைபெறும் வெப்பநிலையில் ஆக்ஸிஜனோடு அது கொண்டுள்ள கவர்ச்சி மற்றும் நிலைப்பாடு ஆகியவற்றைச் சார்ந்துள்ளது.

(இ) வடிவமாகுந் தன்மை

ஓர் உலோகம் திண்ம நிலையில் இருக்கும்போது அதன் அமைப்பினை எளிதாய் மாற்றமுடிந்தால் அது பல உருவ அமைப்புகளுக்கும் ஏற்ற பொருள் எனக்கூறலாம். மேலும், குளிர்நிலையில் ஒருபொருளைப் பிளவுகள் அல்லது வெடிப்புகள் இல்லாமல் எளிதாய் அதன் அமைப்பினை மாற்ற முடியுமானால் அப்பொருள் குளிர்நிலை வடிவமாகுந் தன்மைப்பொருள் (cold workability material) எனக்கூறலாம். அதேபோல் உயர்வெப்பநிலையில் ஒரு பொருள் பிளவுகள் அல்லது வெடிப்புகள் இல்லாமல் எளிதாய் அதன் அமைப்பினை மாற்றமுடிந்தால் அப்பொருள் உயர்வெப்பநிலை வடிவமாகுந்தன்மைப் பொருள் (hot workability material) எனக் கூறலாம். நெகிழ்தன்மையும், கம்பியாகுந்தன்மையும் உலோகங்களின் வடிவமாகுந் தன்மையில் முக்கியப்பங்கு வகிக்கின்றன. உலோகத்தில் வேறுபல தனிமங்களைக் கலக்கும்போது அதன் கம்பியாகுந்தன்மை குறைகிறது. அதனால், அதன் வடிவமாகுந்தன்மையும் குறைகிறது.

(ஈ) வார்ப்பிற்கேற்ற தன்மை

ஓர் உலோகம் திரவநிலையிலிருந்து திண்மநிலைக்கு உறையும் போது அதில் பல வடிவங்களை உறுதியாகவும் எளிதாகவும் அமைக்க முடிந்தால் அந்த உலோகம் வார்ப்பிற்கேற்றது எனக்கூறலாம். அதிகமான பாய்மானம் (fluidity), திண்மநிலைக்கு மாறும்வீதம் குறைவாயும், சுருங்கல்வீதம் குறைவாயும், ஒதுங்குந்தன்மை (segregation) புறக்கணிக்கத்தக்க அளவிலும் உள்ள ஓர் உலோகம் வார்ப்பிற்கேற்ற தன்மையை மிகுதியாய்ப் பெற்றுள்ளது எனக் கூறலாம்.

மாதிரிக்கணக்கு

ஒரு பொருளின் மூலக்கூறுகளுக்கு இடையே உள்ள நிலைஆற்றல்

$$V = \frac{-a}{r^n} + \frac{b}{r^m}.$$

இங்கு $n = 1, m = 9, a = 7.68 \times 10^{-29}$ ஜூல்-மீட்டர். அணுக்களுக்கு இடையே உள்ள சமநிலைத்தூரம் 2.5 ஆங்க்ஸ்ட்ராம் அலகு என எடுத்துக்கொண்டு அப்பொருளின் யங்குணகத்தைக் கணக்கிடுக.

$$\frac{dV}{dr} = \frac{a}{r^2} - \frac{9b}{r^{10}} = 0$$

$$\therefore b = \frac{ar^8}{9} = \frac{7.68 \times 10^{-29} \times (2.5)^8 \times 10^{-80}}{9}$$

$$= 1.3 \times 10^{-106} \text{ ஜூல் மீட்டர்}$$

$$\left.\frac{d^2V}{dr^2}\right|_{r=r_o} = \frac{-2a}{r_o^3} + \frac{90b}{r_0^{11}}$$

$$= \frac{-2 \times 7.68 \times 10^{-29}}{(2.5 \times 10^{-10})^3} + \frac{90 \times 1.3 \times 10^{-106}}{(2.5 \times 10^{-10})^{11}}$$

$$= 39.3 \text{ ஜூல்/மீ}^2$$

$$\text{யங்குணகம்} = \frac{1}{r_o}\left[\frac{d^2V}{dr^2}\right]_{r=r_o} = \frac{39.3}{2.5 \times 10^{-10}}$$

$$= 15.7 \times 10^{10} \text{ நியூட்டன்/மீ}^2$$

சுருக்கம்

1. செயற்படுத்தப்பட்ட தகைவு நீக்கப்பட்டவுடன் தகைவிற்குள்ளான பொருள் தன் தொடக்க நிலைக்கு வருமானால் அதனை மீட்சிப் பொருள் என்பர். செயற்படுத்தப்பட்ட தகைவு நீக்கப்பட்டும் கூடத் தகைவிற்குள்ளான பொருள் தன் தொடக்க நிலைக்கு வரமுடியாவிட்டால் அப்பொருள் நெகிழ்பொருள் எனப்படும்.

2. தகைவு-திரிபு வளைகோடு தகைவிற்குள்ளான பொருளின் பல நிலைகளை விளக்குகிறது.

3. ஒரு பொருளின் யங்குணகம் அதிகமாய் இருந்து, மேலும் அது நொறுங்காத் தன்மையுடையதாயிருந்தால் அப்பொருள் எந்திர வேலைகளுக்கு மிகவும் பயன்படும்.

4. மீட்சி உருமாற்றத்தில் ஏற்படும் உருமாற்றம் தற்காலிகமானது; ஒருபொருளில் மீட்சி உருமாற்றம் நெகிழ் உருமாற்றத்திற்கு முன்பு நடக்கிறது. நெகிழ் உருமாற்றத்தில் ஏற்படும் உருமாற்றம் நிலையானது.

5. நழுவல், அணுத்தளங்களின் நிலையான இடப்பெயர்ச்சியைத் தோற்றுவிக்கிறது; முறுக்கல் அணிக்கோவையின் முகப்புநிலையை மாற்றுகிறது.
6. நிலையான புறவிசை ஒருபொருளில் செயற்படும்போது அப்பொருளில் ஏற்படும் தொடர்ச்சியான உருமாற்றம் சரிதல் எனப்படும். சரிதல் நிகழாமல் இருக்க பொருளில் நன்கு துகள்படுத்தப்பட்ட மிகச்சிறு படிகத்துகள்கள் இருக்கக் கூடாது. சரிதல் நிகழ்ச்சிக்கு அதிகத் தடை கொடுக்கும் பொருள்கள் உயர்வெப்பநிலைப் பொருள்களாய் விளங்குகின்றன.
7. ஒரு பொருளில் தளர்ச்சி, அதனைத் திரும்பத் திரும்பத் தகைவிற்கு உட்படுத்தும்போது உண்டாகிறது.
8. வெப்பப்பதனிடல் செய்முறைகளின் மூலம் உலோகங்களின் கடினத்தன்மை, மென்மை, கம்பியாகுந்தன்மை, காந்தப்பண்பு, ஒடியாத்தன்மை, முரட்டுத்தன்மை ஆகியவற்றின் மதிப்பு உயர்த்தப்படுகிறது.

வினாக்கள்

1. தகைவு-திரிபு வளைகோடு வரைந்து அதன் முக்கியப்பகுதிகளை விளக்குக.
2. யங்குணகத்திற்குரிய கோவையை அணுக்கொள்கை மூலம் தருவித்து, அதன் முக்கியத்துவத்தைக் கூறுக.
3. உருமாற்றம் என்றால் என்ன? உலோகங்களில் ஏற்படும் உருமாற்றங்களை விளக்கிக் கூறுக.
4. வெப்பப்பதனிடல் செய்முறைகளினால் உலோகங்களில் ஏற்படும் மாற்றங்களை விரிவாய் எழுதுக.
5. பொருள்களின் முக்கியத் தொழில்நுட்பப் பண்புகளைப் பற்றி ஒருகட்டுரை வரைக.
6. சிறுகுறிப்பு வரைக:

   (அ) நழுவல் (ஆ) சரிதல் (இ) உலோகங்களின் தளர்ச்சி
   (ஈ) ஆற்றிப்பதனிடல் (உ) உலோகத்தின் கடைசல் தன்மை.

மேற்கோள் நூற்பட்டியல்:

1. 'Engineering Materials II – An Introduction to Microstructure, Processing and Design' – M.F. Ashby and R.H. Jones, Pergmon Press, U.K., 1986.
2. 'Constitution and Properties of Steels' – F. Brian Pickering (Editor), VCH Publishers Inc, New York, 1992.
3. 'Strong Solids' – A. Kelly, Oxford University Press, London, Second Edition, 1973.
4. 'Introduction to Materials Science for Engineers' – James F. Shackelford, Macmillan Publishing Company, New York, Second Edition, 1990.

கலைச் சொற்பட்டியல் - I (தமிழ் - ஆங்கிலம்)

(Glossary of technical terms)

அக ஆற்றல்	Internal energy
அகச்சிகப்புக் கதிர்கள்	Infrared rays
அகடு	Trough
அச்சுச் சுழற்சி	Precession
அடிவாய்	Base
அடுக்குக் குறைபாடு	Stacking fault
அடுக்கு	Layer
அடுக்குக் குறி வகையில்	Exponentially
அண்டை அணுக்கள்	Neighbouring atoms
அண்டைத்தூரம்	Nearest neighbouring distance
அணிக்கோவை ஆற்றல்	Lattice energy
அணிக்கோவை மாறிலி	Lattice parameter, Lattice constant
அணுஇடைத்தூரம்	Interatomic distance
அணு இடைப்பிணைப்பு	Interatomic bond
அணு உலை	Nuclear reactor
அதிர்ச்சி அலை	Shockwave
அதிர்வியக்கம்	Vibrational motion
அதிர்வு பாங்குகள்	Modes of vibration
அதிர்வெண் அடர்த்திக்கோவை	Spectral density function
அபிரகம்	Mica
அமுக்கம்	Compression
அயனிப் பொருள்கள்	Ionic materials
அயனி முனைவாக்கம்	Ionic polarisation
அயனியாக்க மின்னழுத்தம்	Ionization potential
அருமண் தனிமங்கள்	Rare earth elements
அல்லிரும்பியல் காந்தம்	Antiferro magnet
அலகு செல்	Unit cell
அலகு தளம்	Unit plane
அலை இயற்றி	Oscillator
அலை எந்திரவியல்	Wave mechanics
அலைச் சார்பு	Wave function
அலைதிருத்தி	Rectifier
அலைப்பெட்டகம்	Wave packet
அலைவு நேரம்	Period
அலைவுறுதல்	Oscillate
அலை வெக்டார்	Wave vector

அலோகங்கள்	Non metals
அழிவுறும் நிகழ்வு	Annihilation
அழுத்த மின்னியல்	Piezo electricity
அழுந்துந் தன்மை	Compressibility
அளவிகணியம்	Gauge factor
அளவியல்	Metrology
அளவீடுகள்	Measurements
அறுங்கோணம்	Hexagonal
அறுமடக்கு அச்சு	Hexad axis
அனுமதிக்கப்பட்ட மதிப்புகள்	Eigen values
ஆடிப்பிம்பம்	Mirror image
ஆய எண்	Co-ordination number
ஆவி உட்புகும்முறை	Vapor diffusion method
ஆற்றல் இடைவெளி	Energy gap
ஆற்றல் உருவரை	Energy Contour
ஆற்றல் நிலைகளின் அடர்த்தி	Density of states
ஆற்றல் மாற்றிகள்	Transducers
ஆற்றிப்பதனிடல்	Annealing
இசைவுப் பொருத்தம்	Synchronisation
இசைவுறு சுற்று	Tuned circuit
இட அணிக்கோவை	Space lattice
இடப்பெயர்வு	Transition
இடம்புரியாக	Anti clockwise
இடை நிலைப் பிறைகள்	Mesomorphic phases
இடைப்பிணைப்புகள்	Bonds
இடை வளர்ச்சி	Inter-growth
இடைவினை	Interaction
இணைச் செயலுடைப் பொருள்	Co-activator
இணை தளங்கள்	Parallel planes
இணைதிற எலெக்ட்ரான்	Valence electron
இணைதிறப் பட்டை	Valence Band
இணைதிறப் பிணைப்பு	Covalent bond
இணைதிறன்	Valency
இணைந்த பொருள்	Composite material
இணைப்பி	Switch
இணைப்பு ஆற்றல்	Binding energy
இணைப்பெறுமை	Alignment
இயக்கு திறம்	Efficiency
இயங்கு அலைக்குழாய்	Travelling wave tube

இயந்திர வேலைக்கேற்ற தன்மை	Machinability
இயல்பாக்குதல்	Normalising
இயல்பாய குறைகடத்தி	Intrinsic semiconductor
இயல்பாய குறைபாடுகள்	Intrinsic defects
இயலமைப்பு	Structure
இரட்டைப்படைக்கோவை	Even function
இரட்டைப்பண்பு	Dual nature
இரட்டை ஒளிவிலகல்	Double refraction
இரண்டாம் நிலைப் பிணைப்புகள்	Secondary bonds
இரம்பப்பல் அலை	Saw toothed wave
இருப்பு மாறல்	Dislocation
இரும்பியல் காந்தம்	Ferromagnet
இருமடக்கு அச்சு	Diad axis
இருமின் பொருள்கள்	Dielectrics
இருமுனை டிரான்சிஸ்டர்	Bipolar transistor
இருமுனைவு	Dipole
இருமுனைவுத் திருப்புத் திறன்	Dipole moment
இழைகள்	Fibres, filaments
இழைவியக்கத்தளம்	Glide plane
இழுவிசை	Tensile force
இளகு இரும்பு	Soft iron
இளகுநிலைப்புள்ளி	Yield point
இறுக்க விசை	Compressive force
இறுதி வலிமை	Ultimate strength
ஈதல் சகபிணைப்பு	Co-ordinate covalent bond
ஈர்ப்பு விசை	Attractive force
உச்சங்கள்	Peaks
உட்கரு	Nucleus
உட்கவர்தல்	Absorption
உட்கிரகித்தல்	Absorption
உட்கூடுகள்	Orbitals
உட்புலம்	Local field
உடைக்கும் தகைவு	Breaking stress
உணர்திறன்	Sensitivity
உந்தப்பரிமாற்றம்	Momentum transfer
உந்தம்	Momentum
உப்பினிகள்	Halogens
உமிழ்வாய்	Emitter
உயர்வாயு	Noble gas

உயர்வு உலோகங்கள்	Noble metals
உயவு எண்ணெய்	Lubricant
உராய்வு நீக்கு எண்ணெய்	Lubricant
உரிமைப்படிகள்	Degrees of freedom
உருக்கி இணைக்குந் தன்மை	Weldability
உருக்கி இணைத்தல்	Welding
உருக்குலைவு	Distortion
உருகி ஒட்டிய	Melt back
உருகுநிலை	Melting point
உருமாற்றம்	Deformation
உருவ மைய கனசதுர அணிக்கோவை	Body centered cubic lattice
உலோகக்கலவை	Alloy
உள்பரிமாற்று இடைவினை விசை	Inter-change interaction force
உள்ளகம்	Core
உள்ளடங்கல்கள்	Inclusions
உள்ளார்ந்த குறைபாடுகள்	Intrinsic defects
உள்ளீட்டுசைகை	Input signal
உறுதி	Strength
உறுதிப்படுத்தப்பட்ட	Reinforced
ஊடகம்	Medium
ஊடுருவல்	Penetration
எஃகு	Steel
எடுகோள்	Hypothesis
எண்முக இடம்	Octahedral site
எதிர் அயனிகள்	Anions
எதிர் இணை	Antiparallel
எதிர்காந்தம்	Diamagnet
எதிர்ப்பு விசை	Repulsive force
எதிர்முனை	Cathode
எரியூட்டு நிகழ்ச்சி	Firing phenomenon
எல்லை நிபந்தனை	Boundary condition
எலெக்ட்ரான் திரள்	Electron cloud
எலெக்ட்ரானிய அமைப்பு	Electronic configuration
ஏற்பு அணுக்கள்	Acceptor atoms
ஏற்புவாய்	Collector
ஐங்கோணம்	Pentagon
ஒட்டு ஆற்றல்	Cohesive energy
ஒத்ததிர்வு	Resonance
ஒத்தியங்கு	Synchronise

ஒப்பீடு எல்லை	Proportional limit
ஒப்பு மின் மறுப்புத்திறன்	Relative permittivity
ஒருதிசைத் தன்மை	Directionality
ஒருங்கிசைவு	Resonance
ஒரு சாய்கோணம்	Monoclinic
ஒருபடித்தான மில்லா	Non-homogenous
ஒருபடித்தாய முனைவுப்பிணைப்பு	Homopolarbond
ஒருமுனை டிரான்சிஸ்டர்	Unipolar transistor
ஒளி உமிழ் டையோடு	Light emitting diode
ஒளிக்கடத்தல்	Photo conductivity
ஒளிக்கடத்துகலம்	Photo conductive cell
ஒளிக்குழாய்	Photo tube
ஒளித்தெறிப்புக் குழாய்	Flash tube
ஒளிப்படவியல்	Photography
ஒளிபுகா ஊடகம்	Opaque medium
ஒளிமின்கலம்	Photo cell
ஒளிமின் பெருக்கி	Photo multiplier
ஒளி மின்னழுத்த விளைவு	Photo voltaic effect
ஒளிமின் விளைவு	Photo electric effect
ஒளிமீட்சி விளைவு	Photo elastic effect
ஒளியியல் இழைகள்	Optical fibres
ஒளியாலேற்றம்	Optical pumping
ஒளிர்தல்	Fluorescence
ஒளிர்பொருட்கள்	Phosphors
ஒளி விடுதல்	Luminescence
ஒற்றை நிறத்தன்மை	Monochromatic
ஒன்றிடுதல்	Recombination
ஒன்றிய கட்டம்	Inphase
ஓடுதன்மை	Fluidity
ஓமிக் தொடுப்பு	Ohmic contact
ஓரியல் பண்பிலா	Incoherent
ஓரியல் ஒளி	Coherent light
ஃபெர்மி புறப்பரப்பு	Fermi surface
ஃபெரோ மின்பொருள்	Ferro electric material
கட்ட வேறுபாடு	Phase difference
கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்	Free electron
கட்டுண்ட எலக்ட்ரான்	Bound electron
கட்டுப்படுத்தப்பட்ட	Controlled
கடத்தி	Conductor

கடத்து எலெக்ட்ரான்	Conduction electron
கடத்துப் பட்டை	Conduction band
கடினக்காந்தப் பொருள்	Hard magnetic material
கடினத்தன்மை	Hardness
கடைசல் தன்மை	Machinability
கண்ணி	Trap
கண்ணுறு ஒளி	Visible light
கணக்கிடும் கருவி	Calculator
கணக்கியல் கொள்கை	Mathematical theory
கணிப்பொறி	Computer
கணக்கீடு	Calculation
கணியம்	Quantity
கதிர்வீச்சிக்கு உட்படுத்துதல்	Irradiation
கதிர் வீசாப்பெயர்வு	Radiationless transition
கம்பிச்சுருள்	Solenoid
கம்பியாகுந்தன்மை	Ductile
கரிமப் பன்மடிகள்	Organic polymers
கருத்தியல்	Theory
கரைப்பான்	Solvent
கல்நார்	Asbestos
கலப்புச் செயற்பாடு	Hybrid operation
கலப்பு உலோகம் சேர்த்தல்	Alloying
கவர்ச்சி	Affinity
கவள எண்கள்	Quantum numbers
கவளக் கொள்கை	Quantum theory
கவள நிலைகள்	Quantum states
கற்பனைப்பகுதி	Imaginary part
கன செவ்வகம்	Orthorhombic
காட்சி அமைப்பு	Display
காட்டி	Dial
காந்த இருமுனைவு	Magnetic dipole
காந்த உட்புகுதிறன்	Magnetic permeability
காந்த ஏற்புத்திறன்	Magnetic susceptibility
காந்த ஒத்திசைவு பிம்பமாக்கல்	Magnetic Resonance Imaging
காந்தமாக்கச்செறிவு	Intensity of magnetisation
காந்தத் தூண்டல்	Magnetic induction
காந்த திருப்புத்திறன்	Magnetic moment
காந்த நிலைஆற்றல்	Magnetostatic energy
காந்த நீக்குந்திறன்	Coercivity

காந்த நீக்குவிசை	Coercive force
காந்த நீரியங்கு திறன்	Magneto hydrodynamic power
காந்தப் பரிமாண மாற்றம்	Magnetostriction
காந்தப்பாயம்	Magnetic flux
காந்த மென்மையாக்கல்	Magnetic annealing
காந்த விசைக்கோடுகள்	Magnetic lines of force
காப்பான்	Insulator
காப்பிடப்பட்ட பொருள்	Insulated material
காரமண் பொருட்கள்	Alkaline earths
கார ஹாலைடுகள்	Alkali halides
காரீயம்	Lead
காலியிடம்	Vacancy
கிடைமட்டக் கோடு	Horizontal line
கிளர்ச்சியுற்ற நிலை	Excited state
குழல் விளக்கு	Tube light
குழிவு	Void
குளிர்ப்படுத்தும் வேலைகள்	Cryogenic applications
குறிப்பீட்டு ஆற்றல்	Reference energy
குறுக்கல்	Turning
குறுக்கீட்டு விளைவுமானி	Interferometer
குறுக்கு இணைப்பு	Cross linkage
குறுகிய நெடுக்கம்	Short range
குறைபாடுகள்	Defects
கூட்டுமுறை	Summation method
கூடு	Shell
கூம்பகம்	Pyramid
கூர்மையான	Steep
கூறு	Component
கேளா ஒலிகள்	Ultrasonics
கொடை அணுக்கள்	Donor atoms
கோண உந்தம்	Angular momentum
கோணத் திசைவேகம்	Angular velocity
கோவை	Function
கோளகப்படுத்தல்	Spherodizing
கோளச்சமச்சீர்	Spherical symmetry
சகப்பிணைப்பு	Covalent bond
சந்து அணுச் சீர்கேடுகள்	Self interstitial imperfections
சந்து மாசு	Interstitial impurity
சமச்சீர் உறுப்பு	Symmetry element

சமச்சீர் செய்கை	Symmetry operation
சமனச் சுற்று	Bridge circuit
சர்வசம அச்சு	Identity axis
சராசரி மோதலிடைத்தூரம்	Mean freepath
சரிநிகர்	Equivalent
சரிவுத் தடை	Creep resistance
சறுக்குப் பெயர்ச்சி	Shear
சாய்சதுரம்	Rhombohedral, Trigonal
சாய்வு	Slope
சாயலேசர்	Dyelaser
சாளரம்	Window
சிக்கல் இணை	Complex conjugate
சிக்கல் எண்	Complex number
சிற்றுறுதி நிலை	Metastable state
சிறப்பியல் நிறங்கள்	Characteristic colours
சிறப்புக் குறியெண்	Figure of merit
சிறுபான்மை	Minority
சிறுமம்	Minimum
சீர்குலைவு	Breakdown
சீர்கேடுகள்	Imperfections
சீர்மை	Uniformity
சீர்மையிலா	Non-homogeneous
சீரலைவு	Periodic
சீரான ஸ்பைனெல்	Regular spinel
சீரிசை அதிர்வு	Harmonic vibration
சீரிசையற்ற அதிர்வு	Anharmonic vibration
சீரிடை	Periodicity
சீவல்கள்	Chips
சுத்தியல்	Hammer
சுருள்வில்	Spring
சுழல்தலை கீழாக்க அச்சு	Roto-inversion axis
சுழலி	Turbine
சுழற்சி அச்சு	Rotation axis
சுழி மின்னோட்டம்	Eddy current
சுற்றுப்பாதை	Orbit
சுற்றுப்புறச் சூழ்நிலை	Environment
சூரிய மின்கலம்	Solar cell
சூழ் மின்னூட்டம்	Space charge
செய்தித் தொடர்பு	Communication

செயல்முறைகள்	Processeses
செயல் முறைச் சூத்திரம்	Working formula
செயலி	Operator
செயலுடைப் பொருள்	Activator
செயலுறு நிறை	Effective mass
செயலெதிர்ச் செயல்	Interaction
செருகிகள்	Plugs
சைகை	Signal
சேர்மங்கள்	Compounds
சோதித்தல்	Testing
தகடாகுந் தன்மை	Malleability
தகைவு	Stress
தடுப்பு மின்னழுத்தம்	Barrier potential
தண்செயல்	Cold working
தயக்கக்கண்ணி	Hysteresis loop
தயக்க விளைவு	Hysteresis
தயக்க விளைவு ஆற்றலிழப்பு	Hysteresis loss
தரைநிலை	Ground state
தலைகீழ் அணிக்கோவை	Reciprocal lattice
தலைகீழாக்க மையம்	Inversion centre
தலைகீழாய ஸ்பைனெல்	Inverse spinel
தவிர்க்கைத் தத்துவம்	Exclusion principle
தளர்ச்சி	Fatigue
தளர்நேரம்	Relaxation time
தற்கோள்	Assumption
தற்சுழற்சி	Spin
தன்வெப்ப ஏற்புத்திறன்	Specific heat
தன்னியல் காந்தமாக்கல்	Spontaneous magnetisation
தன்னியல் முனைவாக்கம்	Spontaneous polarisation
தன்னியல் வெளியீடு	Spontaneous emission
தனிச் சுழிவெப்பநிலை	Absolute Zero temperature
தனிப்படிகம்	Single crystal
தனிம அட்டவணை	Periodic table
தனிமம்	Element
தனியாக்கி	Isolator
திசைப் பண்புகள்	Directional properties
திசைமுகமாக்கு முனைவாக்கம்	Orientational polarisation
திசைசார் பண்பியற் பொருள்கள்	Anisotropic substances
திசைசாரா பண்பியற் பொருள்கள்	Isotropic substances

திண்மநிலை	Solid state
திரவப்படிகங்கள்	Liquid crystals
திரிபளவி	Strain Gauge
திருகியல் குலைவு	Screw dislocation
திருகுவடிவம்	Spiral ramp
திருப்பம்	Reflection
திருப்பிய சார்பு	Reverse bias
திறன் அளிப்பி	Power supply
துகள்	Grain
துடிப்பு	Pulse
துணைக்கோள்	Satellite
துருப்பிடிக்கா எஃகு	Stainless steel
துல்லியமாக	Exactly
துளை	Hole
துளைத்த ஆழம்	Penetration depth
துளைமலிந்த பொருள்	Porous material
துளைமை	Porosity
துளையிடுதல்	Drilling
தூண்டு உமிழ்வு	Stimulated emission
தூரவியல்	Telemetry
தெவிட்டு மின்னோட்டம்	Saturation current
தேக்க விளைவு	Hysteresis
தேக்குத்திறன்	Retentivity
தேனிரும்பு	Soft iron
தொகுதி	Numerator
தொகு நிலைச்சுற்று	Integrated circuit
தொகுப்பு	Set
தொகுபயன்	Resultant
தொகுநிலை அலைகள்	Stationary waves
தொகைத் தலைகீழாக்கம்	Population inversion
தொகைப்படுத்தல்	Integrate
தொகையம்	Integral
தொகையீடு	Integration
தொடர்ச்சியின்மை	Discontinuity
தொடர்பம் மாதிரி	Continuum model
தொடுகோடு	Tangent
தொடு மின்னழுத்தம்	Contact potential
தோற்றுவாய்	Origin
தோன்றல் நிகழ்வு	Creation

நகர்திறன்	Mobility
நகர்வுத்திசைவேகம்	Drift velocity
நகர்வு பதிவு	Shift register
நகரா மின்னூட்டம்	Immobile charge
நழுவல்	Slip
நழுவு தளம்	Glide plane
நாற்கோணம்	Tetragonel
நான்மடக்கு அச்சு	Tetrad axis
நான்முக இடம்	Tetrahedral site
நிகழ்தகவு	Probability
நிகர்சுற்று	Equivalent circuit
நிச்சயமின்மைத் தத்துவம்	Uncertainty principle
நிலை அளவீடு	Static measurement
நிலைக்காந்தம்	Permanent magnet
நிலைச்சிறப்புவரை	Static characteristic curve
நிலைத்த நிலை	Steady state
நிலைத்தரம்	Standard
நிலைமின்புலவிசை	Electrostatic force
நிலைமாறுபாடு	Phase change
நிலையாற்றல்	Potential energy
நிலையான ஆற்றல் நிலை	Stationary energy state
நிற்கும் அலைகள்	Standing waves
நிறமாலை	Spectrum
நிறமையங்கள்	Colour centers
நிறைசெயல்	Mass action
நின்றொளிர்தல்	Phosphorescence
நினைவு உள்ளகம்	Memory core
நீலக்கல்	Sapphire
நினைவுத்தட்டு	Memory Disc
நீள்விரிஎண்	Coefficient of linear expansion
நீளவாட்டு உருமாற்றம்	Longitudinal deformation
நுண் ஒளிப்படம்	Microphotograph
நுண்ணலை	Microwave
நுண்பொருள்கள்	Microscopic objects
நுண்ணிமம்	Particle
நுண்ணியவடிவில்	Finely divided
நுண்பற்றவைப்பு	Microwelding
நுண்மை	Sensitivity
நுண் வினையங்கள்	Microscopic mechanisms

நெகிழ்சறுக்குப் பெயர்ச்சி	Plastic shear
நெகிழ்தன்மை	Plasticity
நெகிழ்புள்ளி	Yield point
நெடுக்கம்	Range
நெருக்கப்பொதிவு	Close packing
நேர் அயனி	Cation
நேர்பெயர்ச்சி	Translation
நேர்பெயர்ச்சி சமச்சீர்	Transnational symmetry
நேர்வு	Case
நேரம் தாழ்த்துந்சுற்று.	Time delay circuit
நேர மாறிலி	Time constant
நேரிய சுழற்சி	Proper rotation
நொறுங்குந் தன்மை	Brittle
பகிர்தல்	Sharing
பகிர்வு	Distribution
பகுதி	Denominator
பகுப்பான்	Detector, Analyser
பகுப்பு	Resolution
பட்டை இடைவெளி	Band gap
படிக்கோவை	Step function
படிக மில்லாப் பொருள்	Amorphous material
படிகத்துகள்	Grain
படிகவியல்	Crystallography
படிவம்	Pattern
படுஒளி	Incident light
பதிலி மாசு	Substitutional impurity
பரப்பு இழுவிசை	Surface tension
பரப்புக் குறைபாடு	Surface imperfection
பரவளையம்	Parabola
பாகுநிலை	Viscosity
பரிமாற்று ஆற்றல்	Exchange energy
பரிமாற்று இடைவினை	Exchange interaction
பரிமாணம்	Dimension
பருப்பொருள் அலை	Matter wave
பயனுறுதிறன்	Efficiency
பல் அதிர்வி	Multivibrator
பல நிற கதிர்வீச்சு	Polychromatic radiation
பலபடித்தாய முனைவுப்பிணைப்பு	Heteropolar bond
பளுமின்தடை	Load resistor

பன்மடி	Polymer
பாதை வேறுபாடு	Path difference
பாயம்	Flux
பாராக்காந்தம்	Paramagnet
பிணைக்கப்பட்ட மின்னூட்டம்	Bound charge
பிணைப்பாற்றல்	Bonding energy
பிணைப்புநீளம்	Bond Length
பிரதிபலித்தல்	Reflection
பிரதிப்பலிப்பான்	Reflector
பிரதிபலிப்புக் குணகம்	Reflection coefficient
பிரிகை கடினப்படுத்தல்	Dispersion hardening
பிரிகையாற்றல்	Dissociation energy
பீங்கான் பொருள்	Ceramic material
பீஸோமின்பொருள்	Piezoelectric material
புடக்குவளை	Crucible
புடைத்தல்	Bulge
புலச்செறிவு	Field intensity
புலவிளைவு டிரான்சிஸ்டர்	Field effect transistor
புழல் விளைவு	Tunnel effect
புள்ளிக்குழு	Point group
புள்ளிதொடு டிரான்சிஸ்டர்	Point Contact transistor
புள்ளியியல் நிகழ்ச்சி	Statistical phenomenon
புற ஊதாக் கதிர்கள்	Ultra violet rays
புறக்கடினப்படுத்தல்	Case hardening
புறக்கணிக்கத்தக்க	Negligible
புறச்செயலிகள்	External agents
புறவியலாய குறைகடத்தி	Extrinsic semiconductor
புறவேற்றுமை	Allotropy
பெயர்வு வெப்பநிலை	Transition temperature
பெருக்குந்தன்மை	Amplification
பெருங்கூறு	Domain
பெருமம்	Maximum
பொதிவு அடர்த்தி	Density of packing
பொதிவுக் காரணி	Packing factor
பொதுவாயு மாறிலி	Universal gas constant
பொதுவியல்	Civil
பொந்து	Cavity
போலி சமச்சீர்	Pseudo symmetry
மடக்கு	Sequence

மடக்கு நிலை	Periodic
மடக்கை	Logarithm
மடிப்பு	Fold
மண்டலக் கொள்கை	Zone Theory
மணி	Grain
மந்தவாயு	Inert gas
மறுக்கப்பட்ட இடைவெளி	Forbidden gap
மாவு	Powder
மாறாமின்னோட்டம்	Steady current
மாறுதிசை மின்புலம்	Alternating electric field
மாறுநிலை வெப்பநிலை	Critical temperature
மாறுமுனை	Point of inflection
மிகப்பழைய	Classical
மிஞ்சுதல்	Overcome
மில்லர்எண்கள்	Miller indices
மின் இணைதிறப் பிணைப்பு	Electrovalent bond
மின்எதிர்ப்புத்திறன்	Resistivity
மின் ஒளியியல் நிகழ்ச்சி	Electrooptical phenomenon
மின்கடத்துந் திறன்	Electrical conductivity
மின் கடத்தாப்பொருள்கள்	Dielectrics, Dielectric materials
மின்கடத்தாப்பொருள்இழப்புகள்	Dielectric losses
மின்கடத்தாப் பொருள் மாறிலி	Dielectric constant
மின்கடத்தாமை எண்	Dielectric constant
மின்கல அடுக்கு	Battery
மின்காந்த இணைப்பி	Relay
மின்காப்புப் பொருள்	Insulating material
மின்செலுத்துகை வழி	Electrical transmission line
மின்தடைமாற்றி	Rheostat
மின்தேக்குத்திறன்	Capacitance
மின்நடுநிலைமை	Electrical neutrality
மின்பகுப்பு	Electrolysis
மின்பங்கீட்டு வழி	Electrical distribution line
மின்பரிமாண மாற்றம்	Electrostriction
மின்பொறி விளக்கு	Arc lamp
மின்மறுப்பு	Impedance
மின்மறுப்புத்திறன்	Permittivity
மின்மாற்றிகள்	Transformers
மின்னணுவியல்	Electronics
மின்னழுத்த அளவி	Potentiometer

மின்னழுத்த சீர் தூக்கி	Voltage Regulator
மின்னிறக்கம்	Discharge
மீக்கடத்தல்	Superconduction
மீக்கடத்திகள்	Superconductors
மீக்கடத்துந்திறன்	Superconductivity
மீட்சி அலை	Elastic wave
மீட்சிஎல்லை	Elastic limit
மீட்சித்தன்மை	Elasticity
மீந்தக்காந்தத்தன்மை	Residual magnetism
மீயொலிகள்	Ultrasonics
மீள்அலை	Elastic wave
மீள்மடி	Elastomer
மீள்செயல் பெருங்கூறு	Reversible domain
மீளாச்செயல் பெருங்கூறு	Irreversible domain
முகடு	Crest
முகப்புத்தட்டுகாட்டி	Dial indicator
முகப்புநிலை	Orientation
முகமைய கனசதுர அணிக்கோவை	Face centered cubic lattice
முடுக்குதல்	Accelerate
முதன்மைக்கவள எண்	Principal quantum number
முதன்மைப்பிணைப்புகள்	Primary bonds
முதுபழங்கொள்கை	Classical theory
மும்மடக்கு அச்சு	Triad axis
முரட்டுத்தன்மை	Toughness
முற்றிசைவு	Fidelity
முறிவு	Fracture
முறுக்கு	Twist
முறுக்கல்	Twinning
முன்னோக்கிய சார்பு	Forward bias
முனைவாக்க அனுமதித்திறன்	Permittivity
முனைவாக்கத்திறன்	Polarizability
முனைவுக்கரைப்பான்	Polar solvent
மூல அணிக்கோவை	Primitive lattice
மூல அலகு செல்	Primitive cell
மூலக்கூறு	Molecule
மூன்று சாய்கோணம்	Triclinic
மெல்லேடு	Thin film
மென் கம்பி	Wire
மென்படலம்	Thin film

மேல் ஆழம்	Skin depth
மேற்பொருந்துதல்	Overlapping
லேப்லாஸ் மாற்று	Laplace transform
வகையீடு	Differentiation
வடிப்பான்	Filter
வடிவமாறிலிகள்	Geometrical constants
வடிவயியல்	Geometry
வரை	Graph
வழுக்கல்தளம்	Slip plane
வற்றிய பகுதி	Depletion region
வாயில் சுற்று	Gating circuit
வாயுக்களின் இயக்கக்கொள்கை	Kinetic Theory of Gases
வாழ்வு நேரம்	Lifetime
விகார நிலைப்பு	Permanent set
விடுதிறன்	Permittivity
விரவல் மாறிலி	Diffusion constant
விலகிய கட்டம்	Out of phase
விளிம்பு விளைவு	Diffraction
விறைப்பாக்குதல்	Tempering
விறைப்பு	Stiffness
வெட்டுத்துண்டு	Intercept
வெப்ப அதிர்ச்சித்தடை	Thermal shock resistance
வெப்ப அயனி உமிழ்வு	Thermionic emission
வெப்ப இயக்கவியல்	Thermodynamics
வெப்ப உறை நெகிழி	Thermosetting plastic
வெப்ப எண்	Specific heat
வெப்ப எழுச்சி	Thermal agitation
வெப்ப ஏற்புத்திறன்	Thermal capacity
வெப்ப நெகிழி	Thermoplastic
வெப்பந்தாங்கி	Refractory
வெப்பப்பதனிடல்	Heat treatment
வெப்பங் கடத்துந் திறன்	Thermal conductivity
வெப்பம் பரவுதல்	Transfer of heat
வெப்பமின்தடை	Thermistor
வெப்ப மின்தடைக் குணகம்	Temperature coefficient of resistance
வெப்ப மின்பொருட்கள்	Thermo-electric materials
வெப்பவிரிவு	Thermal expansion
வெளியேற்று ஆற்றல்	Work function
வேகமாய் குளிர்ப்படுத்தல்	Quenching

கலைச் சொற்பட்டியல் - II (ஆங்கிலம் - தமிழ்)

Absolute zero temperature	தனிச் சுழிவெப்பநிலை
Absorption	உட்கிரகித்தல், உட்கவர்தல்
Accelerate	முடுக்குதல்
Acceptor atoms	ஏற்பு அணுக்கள்
Activator	செயலூட்டும் பொருள்
Affinity	கவர்ச்சி
Alignment	இணைப்பெறுமை
Alkali halides	கார ஹாலைடுகள்
Alkaline earths	காரமண் பொருள்கள்
Allotropy	புறவேற்றுமை
Alloy	உலோகக்கலவை
Alloying	கலப்பு உலோகம் சேர்த்தல்
Alternating electric field	மாறுதிசை மின்புலம்
Amorphous material	படிக மில்லாப் பொருள்
Amplification	பெருக்குந்தன்மை
Angular momentum	கோண உந்தம்
Angular velocity	கோணத் திசைவேகம்
Anharmonic vibration	சீரிசையற்ற அதிர்வு
Anions	எதிர் அயனிகள்
Anisotropic substances	திசைசார்பண்பியற்பொருள்கள்
Annealing	ஆற்றிப்பதனிடல்
Annihilation	அழிவுறும் நிகழ்வு
Anti clockwise	இடம்புரியாக
Antiferro magnet	அல்லிரும்பியல் காந்தம்
Antiparallel	எதிரிணை
Arc lamp	மின்பொறி விளக்கு
Asbestos	கல்நார்
Assumption	தற்கோள்
Attractive force	ஈர்ப்பு விசை
Band gap	பட்டை இடைவெளி
Barrier potential	தடுப்பு மின்னழுத்தம்
Base	அடிவாய்
Battery	மின்கல அடுக்கு
Binding energy	இணைப்பாற்றல்
Bipolar transistor	இருமுனை டிரான்சிஸ்டர்
Body centered cubic lattice	உருவ மைய கனசதுர அணிக்கோவை

Bond length	பிணைப்புநீளம்
Bonding energy	பிணைப்பு ஆற்றல்
Bonds	இடைப்பிணைப்புகள்
Bound charge	பிணைக்கப்பட்ட மின்னூட்டம்
Bound electron	கட்டுண்ட எலெக்ட்ரான்
Boundary condition	எல்லை நிபந்தனை
Breakdown	சீர்குலைவு
Breaking stress	உடைக்கும் தகைவு
Bridge circuit	சமனச் சுற்று
Brittle	நொறுங்குந் தன்மை
Bulge	புடைத்தல்
Calculation	கணக்கீடு
Calculator	கணக்கிடும் கருவி
Capacitance	மின்தேக்குத்திறன்
Case	நேர்வு
Case hardening	புறக்கடினப்படுத்தல்
Cathode	எதிர்முனை
Cation	நேர் அயனி
Cavity	பொந்து
Ceramic material	பீங்கான் பொருள்
Characteristic colours	சிறப்பியல் நிறங்கள்
Chips	சீவல்கள்
Civil	பொதுவியல்
Classical	மிகப்பழைய
Classical theory	முதுபழங்கொள்கை
Close packing	நெருக்கப்பொதிவு
Co-activator	இணைச் செயலுடைப் பொருள்
Co-ordinate covalent bond	ஈதல் சகபிணைப்பு
Co-ordination number	ஆய எண்
Coefficient of linear expansion	நீள்விரிஎண்
Coercive force	காந்த நீக்குவிசை
Coercivity	காந்த நீக்குந்திறன்
Coherent light	ஓரியல் ஒளி
Cohesive energy	ஒட்டு ஆற்றல்
Cold working	தண்செயல்
Collector	ஏற்புவாய்
Colour centers	நிறமையங்கள்
Communication	செய்தித் தொடர்பு
Complex conjugate	சிக்கல் இணை

Complex number	சிக்கல் எண்
Component	கூறு
Composite material	இணைந்த பொருள்
Compounds	சேர்மங்கள்
Compressibility	அமுழ்ந்துந் தன்மை
Compression	அமுக்கம்
Compressive force	இறுக்க விசை
Computer	கணிப்பொறி
Conduction band	கடத்துப் பட்டை
Conduction electron	கடத்து எலெக்ட்ரான்
Conductor	கடத்தி
Contact potential	தொடு மின்னழுத்தம்
Continuum model	தொடர்பம் மாதிரி
Controlled	கட்டுப்படுத்தப்பட்ட
Core	உள்ளகம்
Covalent bond	இணைதிறப் பிணைப்பு, சகபிணைப்பு
Creation	தோன்றல் நிகழ்வு
Creep resistance	சரிவுத் தடை
Crest	முகடு
Critical temperature	மாறுநிலை வெப்பநிலை
Cross linkage	குறுக்கு இணைப்பு
Crucible	புடக்குவளை
Cryogenic applications	குளிர்ப்படுத்தும் வேலைகள்
Crystallography	படிகவியல்
Defects	குறைபாடுகள்
Deformation	உருமாற்றம்
Degrees of freedom	உரிமைப்படிகள்
Denominator	பகுதி
Density of states	ஆற்றல் நிலைகளின் அடர்த்தி
Density of packing	பொதிவு அடர்த்தி
Depletion region	வற்றிய பகுதி
Detector	பகுப்பான்
Diad axis	இருமடக்கு அச்சு
Dial	காட்டி
Dial indicator	முகப்புத்தட்டுகாட்டி
Diamagnet	எதிர்காந்தம்
Dielectric constant	மின்கடத்தாப் பொருள் மாறிலி
Dielectric losses	மின்கடத்தாப்பொருள்இழப்புகள்
Dielectrics	இருமின் பொருள்கள்

Dielectric materials	மின் கடத்தாப்பொருள்கள்
Differentiation	வகையீடு
Diffraction	விளிம்பு விளைவு
Diffusion constant	விரவல் மாறிலி
Dimension	பரிமாணம்
Dipole	இருமுனைவு
Dipole moment	இருமுனைவுத் திருப்புத் திறன்
Directional properties	திசைப் பண்புகள்
Directionality	ஒருதிசைத் தன்மை
Discharge	மின்னிறக்கம்
Discontinuity	தொடர்ச்சியின்மை
Dislocation	இருப்பு மாறல்
Dispersion hardening	பிரிகை கடினப்படுத்தல்
Display	காட்சி அமைப்பு
Dissociation energy	பிரிகையாற்றல்
Distortion	உருக்குலைவு
Distribution	பகிர்வு
Domain	பெருங்கூறு
Donor atoms	கொடை அணுக்கள்
Double refraction	இரட்டை ஒளிவிலகல்
Drift velocity	நகர்வுத்திசைவேகம்
Drilling	துளையிடுதல்
Dual nature	இரட்டைப்பண்பு
Ductile	கம்பியாகுந்தன்மை
Dyelaser	சாயலேசர்
Eddy current	சுழி மின்னோட்டம்
Effective mass	செயலுறு நிறை
Efficiency	பயனுறுதிறன், இயக்கு திறம்
Eigen values	அனுமதிக்கப்பட்ட மதிப்புகள்
Elastic limit	மீட்சிஎல்லை
Elastic wave	மீள்அலை, மீட்சி அலை
Elasticity	மீட்சித்தன்மை
Elastomer	மீள்மடி
Electrical conductivity	மின்கடத்துந் திறன்
Electrical distribution line	மின்பங்கீட்டு வழி
Electrical neutrality	மின்நடுநிலைமை
Electrical transmission line	மின்செலுத்துகை வழி
Electrolysis	மின்பகுப்பு
Electron cloud	எலெக்ட்ரான் திரள்

Electronic configuration	எலெக்ட்ரானிய அமைப்பு
Electronics	மின்னணுவியல்
Electrooptical phenomenon	மின் ஒளியியல் நிகழ்ச்சி
Electrostatic force	நிலைமின்புலவிசை
Electrostriction	மின்பரிமாண மாற்றம்
Electrovalent bond	மின் இணைதிறப் பிணைப்பு
Element	தனிமம்
Emitter	உமிழ்வாய்
Energy Contour	ஆற்றல் உருவரை
Energy gap	ஆற்றல் இடைவெளி
Environment	சுற்றுப்புறச் சூழ்நிலை
Equivalent	சரிநிகர்
Equivalent circuit	நிகர்ச்சுற்று
Even function	இரட்டைப்படைக்கோவை
Exactly	துல்லியமாக
Exchange energy	பரிமாற்று ஆற்றல்
Exchange interaction	பரிமாற்று இடைவினை
Excited state	கிளர்ச்சியுற்ற நிலை
Exclusion principle	தவிர்க்கைத் தத்துவம்
Exponentially	அடுக்குக் குறி வகையில்
External agents	புறச்செயலிகள்
Extrinsic semiconductor	புறவியலாய குறைகடத்தி
Fatigue	தளர்ச்சி
Fermi surface	ஃபெர்மி புறப்பரப்பு
Ferro electric material	ஃபெரோ மின்பொருள்
Ferromagnet	இரும்பியல் காந்தம்
Fibres	இழைகள்
Fidelity	முற்றிசைவு
Field effect transistor	புலவிளைவு டிரான்சிஸ்டர்
Field intensity	புலச்செறிவு
Figure of merit	சிறப்புக் குறியெண்
Filaments	இழைகள்
Filter	வடிப்பான்
Finely divided	நுண்ணியவடிவில்
Firing phenomenon	எரியூட்டு நிகழ்ச்சி
Flash tube	ஒளித்தெறிப்புக் குழாய்
Fluidity	ஓடுதன்மை
Fluorescence	ஒளிர்தல்
Flux	பாயம்

Fold	மடிப்பு
Forbidden gap	மறுக்கப்பட்ட இடைவெளி
Forward bias	முன்னோக்கிய சார்பு
Fracture	முறிவு
Face centered cubic lattice	முகமைய கனசதுர அணிக்கோவை
Free electron	கட்டற்ற எலெக்ட்ரான்
Function	கோவை
Gating circuit	வாயில் சுற்று
Gauge factor	அளவிகணியம்
Geometry	வடிவயியல்
Glide plane	நழுவு தளம், இழைவியக்கத்தளம்
Grain	மணி, துகள், படிகத்துகள்
Graph	வரை
Ground state	தரைநிலை
Halogens	உப்பினிகள்
Hammer	சுத்தியல்
Hard magnetic material	கடினக்காந்தப் பொருள்
Hardness	கடினத்தன்மை
Harmonic vibration	சீரிசை அதிர்வு
Heat treatment	வெப்பப்பதனிடல்
Heteropolar bond	பலபடித்தாய முனைவுப்பிணைப்பு
Hexad axis	அறுமடக்கு அச்சு
Hexagonal	அறுங்கோணம்
Hole	துளை
Homopolarbond	ஒருபடித்தாய முனைவுப்பிணைப்பு
Horizontal line	கிடைமட்டக் கோடு
Hybrid operation	கலப்புச் செயற்பாடு
Hysteresis	தேக்க விளைவு, தயக்க விளைவு
Hysteresis loop	தயக்கக்கண்ணி
Hysteresis loss	தயக்க விளைவு ஆற்றலிழப்பு
Identity axis	சர்வசம அச்சு
Imaginary part	கற்பனைப்பகுதி
Immobile charge	நகரா மின்னூட்டம்
Impedance	மின்மறுப்பு
Imperfections	சீர்கேடுகள்
Incident light	படுஒளி
Inclusions	உள்ளடங்கல்கள்
Incoherent	ஓரியல் பண்பிலா
Inert gas	மந்தவாயு

Infrared rays	அகச்சிகப்புக் கதிர்கள்
Inphase	ஒன்றிய கட்டம்
Input signal	உள்ளீட்டுசைகை
Insulated material	காப்பிடப்பட்ட பொருள்
Insulating material	மின்காப்புப் பொருள்
Insulator	காப்பான்
Integral	தொகையம்
Integrate	தொகைப்படுத்தல்
Integrated circuit	தொகு நிலைச்சுற்று
Integration	தொகையீடு
Intensity of magnetisation	காந்தமாக்கச் செறிவு
Inter change interaction force	உள்பரிமாற்று இடைவினை விசை
Inter - growth	இடை வளர்ச்சி
Interaction	இடைவினை, செயலெதிர்ச் செயல்
Interatomic bond	அணு இடைப்பிணைப்பு
Interatomic distance	அணுஇடைத்தூரம்
Intercept	வெட்டுத்துண்டு
Interferometer	குறுக்கீட்டு விளைவுமானி
Internal energy	அக ஆற்றல்
Interstitial impurity	சந்து மாசு
Intrinsic defect	இயல்பாய குறைபாடு, உள்ளார்ந்த குறைபாடு
Intrinsic semiconductor	இயல்பாய குறைகடத்தி
Inverse spinel	தலைகீழாய ஸ்பைனெல்
Inversion centre	தலைகீழாக்க மையம்
Ionic materials	அயனிப் பொருள்கள்
Ionic polarisation	அயனி முனைவாக்கம்
Ionization potential	அயனியாக்க மின்னழுத்தம்
Irradiation	கதிர்வீச்சுக்கு உட்படுத்துதல்
Irreversible domain	மீளாச்செயல் பெருங்கூறு
Isolator	தனியாக்கி
Isotropic substances	திசைசாரா பண்பியற் பொருள்கள்
Kinetic theory of gases	வாயுக்களின் இயக்ககொள்கை
Laplace transform	லேப்லாஸ் மாற்று
Lattice constant	அணிக்கோவை மாறிலி
Lattice energy	அணிக்கோவை ஆற்றல்
Lattice parameter	அணிக்கோவை மாறிலி
Layer	அடுக்கு
Lead	காரீயம்
Lifetime	வாழ்வு நேரம்

Light emitting diode	ஒளி உமிழ் டையோடு
Liquid crystals	திரவப்படிகங்கள்
Load resistor	பளுமின் தடை
Local field	உட்புலம்
Logarithm	மடக்கை
Longitudinal deformation	நீளவாட்டு உருமாற்றம்
Lubricant	உராய்வு நீக்கு எண்ணெய், உயவு எண்ணெய்
Luminescence	ஒளி விடுதல்
Machinability	கடைசல் தன்மை, இயந்திர வேலைக்கேற்ற தன்மை
Magnetic annealing	காந்த மென்மையாக்கல்
Magnetic dipole	காந்த இருமுனைவு
Magnetic flux	காந்தப்பாயம்
Magnetic induction	காந்தத் தூண்டல்
Magnetic lines of force	காந்த விசைக்கோடுகள்
Magnetic moment	காந்த திருப்புத்திறன்
Magnetic permeability	காந்த உட்புகுதிறன்
Magnetic resonance imaging	காந்த ஒத்திசைவு பிம்பமாக்கல்
Magnetic susceptibility	காந்த ஏற்புத்திறன்
Magnetostatic energy	காந்த நிலைஆற்றல்
Magnetostriction	காந்தப் பரிமாண மாற்றம்
Magneto hydrodynamic power	காந்த நீரியங்கு திறன்
Malleability	தகடாகுந் தன்மை
Mass action	நிறைசெயல்
Mathematical theory	கணக்கியல் கொள்கை
Matter wave	பருப்பொருள் அலை
Maximum	பெருமம்
Mean freepath	சராசரிமோதலிடைத்தூரம்
Measurements	அளவீடுகள்
Medium	ஊடகம்
Melt back	உருகி ஒட்டிய
Melting point	உருகுநிலை
Memory core	நினைவு உள்ளகம்
Memory Disc	நினைவுத்தட்டு
Mesomorphic phases	இடைநிலைப் பிறைகள்
Metastable state	சிற்றுறுதி நிலை
Metrology	அளவியல்
Mica	அபிரகம்
Microphotograph	நுண் ஒளிப்படம்
Microscopic mechanisms	நுண் வினையங்கள்

Microscopic objects	நுண்பொருள்கள்
Microwave	நுண்ணலை
Microwelding	நுண்பற்றவைப்பு
Mild steel	மென் எஃகு
Miller indices	மில்லர்எண்கள்
Minimum	சிறுமம்
Minority	சிறுபான்மை
Mirror image	ஆடிப்பிம்பம்
Mobility	நகர்திறன்
Modes of vibration	அதிர்வு பாங்குகள்
Molecule	மூலக்கூறு
Momentum	உந்தம்
Momentum transfer	உந்தப்பரிமாற்றம்
Monochromatic	ஒற்றை நிறத்தன்மை
Monoclinic	ஒரு சாய்கோணம்
Multivibrator	பல் அதிர்வி
Nearest neighbouring distance	அண்டைத்தூரம்
Negligible	புறக்கணிக்கத்தக்க
Neighbouring atoms	அண்டை அணுக்கள்
Noble gas	மேதகு வாயு, உயர்வாயு
Noble metals	உயர்வு உலோகங்கள்
Non-homogeneous	சீர்மையிலா, ஒருபடித்தானமில்லா
Non metals	அலோகங்கள்
Normalising	இயல்பாக்குதல்
Nuclear reactor	அணு உலை
Nucleus	உட்கரு
Numerator	தொகுதி
Octahedral site	எண்முக இடம்
Ohmic contact	ஓமிக் தொடுப்பு
Opaque medium	ஒளிபுகா ஊடகம்
Operator	செயலி
Optical fibres	ஒளியியல் இழைகள்
Optical pumping	ஒளியாலேற்றம்
Orbit	சுற்றுப்பாதை
Orbitals	உட்கூடுகள்
Organic polymers	கரிமப் பன்மடிகள்
Orientation	முகப்பு நிலை
Orientational polarisation	திசைமுகமாக்கு முனைவாக்கம்
Origin	தோற்றுவாய்

Orthorhombic	.கன செவ்வகம்
Oscillate	அலைவுறுதல்
Oscillator	அலை இயற்றி
Out of phase	விலகிய கட்டம்
Overcome	மிஞ்சுதல்
Overlapping	மேற்பொருந்துதல்
Packing factor	பொதிவுக் காரணி
Parabola	பரவளையம்
Parallel planes	இணை தளங்கள்
Paramagnet	பாராக்காந்தம்
Particle	நுண்ணிமம்
Path difference	பாதை வேறுபாடு
Pattern	படிவம்
Peaks	உச்சங்கள்
Penetration	ஊடுருவல்
Penetration depth	துளைத்த ஆழம்
Pentagon	ஐங்கோணம்
Period	அலைவு நேரம்
Periodic	சீரலைவு
Periodic	மடக்கு நிலை
Periodic table	தனிம அட்டவணை
Periodicity	சீரிடை
Permanent magnet	நிலைக்காந்தம்
Permanent set	விகார நிலைப்பு
Permittivity	மின்மறுப்புத்திறன், முனைவாக்க அனுமதித்திறன்
Phase change	நிலைமாறுபாடு
Phase difference	கட்ட வேறுபாடு
Phosphorescence	நின்றொளிர்தல்
Phosphors	ஒளிர்பொருட்கள்
Photo cell	ஒளிமின்கலம்
Photo conductive cell	ஒளிக்கடத்துகலம்
Photo conductivity	ஒளிக்கடத்தல்
Photo elastic effect	ஒளிமீட்சி விளைவு
Photo electric effect	ஒளிமின் விளைவு
Photo multiplier	ஒளிமின் பெருக்கி
Photo tube	ஒளிக்குழாய்
Photo voltaic effect	ஒளி· மின்னழுத்த விளைவு
Photography	ஒளிப்படவியல்
Piezo electricity	அழுத்த மின்னியல்

Piezoelectric material	பீஸோமின்பொருள்
Plastic shear	நெகிழ்சறுக்குப் பெயர்ச்சி
Plasticity	நெகிழ்தன்மை
Plugs	செருகிகள்
Point contact transistor	புள்ளிதொடு டிரான்சிஸ்டர்
Point group	புள்ளிக்குழு
Point of inflection	மாறுமுனை
Polar solvent	முனைவுக்கரைப்பான்
Polarizability	முனைவாக்கத்திறன்
Polychromatic radiation	பல் நிற கதிர்வீச்சு
Polymer	பன்மடி
Population inversion	தொகைத் தலைகீழாக்கம்
Porosity	துளைமை
Porous material	துளைமலிந்த பொருள்
Potential energy	நிலையாற்றல்
Potentiometer	மின்னழுத்த அளவி
Powder	மாவு
Power supply	திறன் அளிப்பி
Precession	அச்சுச் சுழற்சி
Primary bonds	முதன்மைப்பிணைப்புகள்
Primitive cell	மூல அலகு செல்
Primitive lattice	மூல அணிக்கோவை
Principal quantum number	முதன்மைக்கவள எண்
Probability	நிகழ்தகவு
Processeses	செயல்முறைகள்
Proper rotation	நேரிய சுழற்சி
Proportional limit	ஒப்பீடு எல்லை
Pseudo symmetry	போலி சமச்சீர்
Pulse	துடிப்பு
Pyramid	கூம்பகம்
Quantity	கணியம்
Quantum' numbers	கவள எண்கள்
Quantum states	கவள நிலைகள்
Quantum theory	கவளக் கொள்கை
Quenching	வேகமாய் குளிர்ப்படுத்தல்
Radiationless transition	கதிர் வீசாப்பெயர்வு
Range	நெடுக்கம்
Rare earth elements	அருமண் தனிமங்கள்
Reciprocal lattice	தலைகீழ் அணிக்கோவை

Recombination	ஒன்றிடுதல்
Rectifier	அலைதிருத்தி
Reference energy	குறிப்பீட்டு ஆற்றல்
Reflection	பிரதிபலித்தல், திருப்பம்
Reflection coefficient	பிரதிபலிப்புக் குணகம்
Reflector	பிரதிப்பலிப்பான்
Refractory	வெப்பந்தாங்கி
Regular spinel	சீரான ஸ்பைனெல்
Reinforced	உறுதிப்படுத்தப்பட்ட
Relative permittivity	ஒப்புமின்மறுப்புத்திறன்
Relaxation time	தளர்நேரம்
Relay	மின்காந்த இணைப்பி
Repulsive force	எதிர்ப்பு விசை
Residual magnetism	மீந்தக்காந்தத்தன்மை
Resistivity	மின்எதிர்ப்புத்திறன்
Resolution	பகுப்பு
Resonance	ஒத்ததிர்வு, ஒருங்கிசைவு
Resultant	தொகுபயன்
Retentivity	தேக்குத்திறன்
Retina	விழித்திரை
Reverse bias	திருப்பிய சார்பு
Reversible domain	மீள்செயல் பெருங்கூறு
Rheostat	மின்தடைமாற்றி
Rhombohedral	சாய்சதுரம்
Rotation axis	சுழற்சி அச்சு
Rotation inversion axis	சுழல் தலைகீழாக்க அச்சு
Sapphire	நீலக்கல்
Satellite	துணைக்கோள்
Saturation current	தெவிட்டு மின்னோட்டம்
Saw toothed wave	இரம்பப்பல் அலை
Screw dislocation	திருகியல் குலைவு
Secondary bonds	இரண்டாம் நிலைப் பிணைப்புகள்
Self interstitial imperfections	சந்து அணுச் சீர்கேடுகள்
Sensitivity	நுண்மை, உணர்திறன்
Sequence	மடக்கு
Set	தொகுப்பு
Sharing	பகிர்தல்
Shear	சறுக்குப் பெயர்ச்சி
Shell	கூடு

Shift register	நகர்வு பதிவு
Shockwave	அதிர்ச்சி அலை
Short range	குறுகிய நெடுக்கம்
Signal	சைகை
Single crystal	தனிப்படிகம்
Skin depth	மேல் ஆழம்
Slip	நழுவல்
Slip plane	வழுக்கல்தளம்
Slope	சாய்வு
Soft iron	தேனிரும்பு, இளகு இரும்பு
Solar cell	சூரிய மின்கலம்
Solenoid	கம்பிச்சுருள்
Solid state	திண்மநிலை
Solvent	கரைப்பான்
Space charge	சூழ் மின்னூட்டம்
Space lattice	இட அணிக்கோவை
Specific heat	தன்வெப்ப ஏற்புத்திறன், வெப்ப எண்
Spectral density function	அதிர்வெண் அடர்த்திக்கோவை
Spectrum	நிறமாலை
Spherical symmetry	கோளச்சமச்சீர்
Spherodizing	கோளகப்படுத்தல்
Spin	தற்சுழற்சி
Spiral ramp	திருகுவடிவம்
Spontaneous emission	தன்னியல் வெளியீடு
Spontaneous magnetisation	தன்னியல் காந்தமாக்கல்
Spontaneous polarisation	தன்னியல் முனைவாக்கம்
Spring	சுருள்வில்
Stacking fault	அடுக்குக் குறைபாடு
Stainless steel	துருப்பிடிக்கா எஃகு
Standard	நிலைத்தரம்
Standing waves	நிற்கும் அலைகள்
Static characteristic curve	நிலைச்சிறப்புவரை
Static measurement	நிலை அளவீடு
Stationary energy state	நிலையான ஆற்றல் நிலை
Stationary waves	தொகுநிலை அலைகள்
Statistical phenomenon	புள்ளியியல் நிகழ்ச்சி
Steady current	மாறாமின்னோட்டம்
Steady state	நிலைத்த நிலை
Steel	எஃகு

Steep	கூர்மையான
Step function	படிக்கோவை
Stiffness	விறைப்பு
Stimulated emission	தூண்டு உமிழ்வு
Strain Gauge	திரிபளவி
Strength	உறுதி
Stress	தகைவு
Structure	இயலமைப்பு
Substitutional impurity	பதிலி மாசு
Summation method	கூட்டுமுறை
Superconduction	மீக்கடத்தல்
Superconductivity	மீக்கடத்துந்திறன்
Superconductors	மீக்கடத்திகள்
Surface imperfection	பரப்புக் குறைபாடு
Surface tension	பரப்பு இழுவிசை
Switch	இணைப்பி
Symmetry element	சமச்சீர் உறுப்பு
Symmetry operation	சமச்சீர் செய்கை
Synchronise	ஒத்தியங்கு
Synchronisation	இசைவுப் பொருத்தம்
Tangent	தொடுகோடு
Telemetry	தூரவியல்
Temperature coefficient of resistance	வெப்ப மின்தடைக் குணகம்
Tempering	விறைப்பாக்குதல்
Tensile force	இழுவிசை
Testing	சோதித்தல்
Tetrad axis	நான்மடக்கு அச்சு
Tetragonel	நாற்கோணம்
Tetrahedral site	நான்முக இடம்
Theory	கருத்தியல்
Thermal agitation	வெப்ப எழுச்சி
Thermal capacity	வெப்ப ஏற்புத்திறன்
Thermal conductivity	வெப்பங் கடத்துந் திறன்
Thermal expansion	வெப்பவிரிவு
Thermal shock resistance	வெப்ப அதிர்ச்சித்தடை
Thermionic emission	வெப்ப அயனி உமிழ்வு
Thermistor	வெப்பமின்தடை
Thermo-electric materials	வெப்ப மின்பொருள்கள்
Thermodynamics	வெப்ப இயக்கவியல்

Thermoplastic	வெப்ப நெகிழி
Thermosetting plastic	வெப்ப உறை நெகிழி
Thin film	மென்படலம், மெல்லேடு
Time constant	நேர மாறிலி
Time delay circuit	நேரம் தாழ்த்துந் சுற்று
Toughness	முரட்டுத்தன்மை
Transducers	ஆற்றல் மாற்றிகள்
Transfer of heat	வெப்பம் பரவுதல்
Transformers	மின்மாற்றிகள்
Transition	இடப்பெயர்வு
Transition temperature	பெயர்வு வெப்பநிலை
Translation	நேர்பெயர்ச்சி
Transnational symmetry	நேர்பெயர்ச்சி சமச்சீர்
Trap	கண்ணி
Travelling wave tube	இயங்கு அலைக்குழாய்
Triclinic	மூன்று சாய்கோணம்
Triad axis	மும்மடக்கு அச்சு
Trough	அகடு
Tuned circuit	இசைவுறு சுற்று
Tunnel effect	புழல் விளைவு
Turbine	சுழலி
Turning	குறுக்கல்
Twinning	முறுக்கல்
Twist	முறுக்கு
Ultimate strength	இறுதி வலிமை
Ultra violet rays	புற ஊதாக் கதிர்கள்
Ultrasonics	மீயொலிகள், கேளாஒலிகள்
Uncertainty principle	நிச்சயமின்மைத் தத்துவம்
Uniformity	சீர்மை
Unipolar transistor	ஒருமுனை டிரான்சிஸ்டர்
Unit cell	அலகு செல்
Unit plane	அலகு தளம்
Universal gas constant	பொதுவாயு மாறிலி
Vacancy	காலியிடம்
Valence band	இணைதிறப் பட்டை
Valence electron	இணைதிற எலெக்ட்ரான்
Valency	இணைதிறன்
Vapor diffusion method	ஆவி உட்புகும்முறை
Vibrational motion	அதிர்வியக்கம்

Viscosity	பாகுநிலை
Visible light	கண்ணுறு ஒளி
Void	குழிவு
Voltage Regulator	மின்னழுத்த சீர் தூக்கி
Wave function	அலைச் சார்பு
Wave mechanics	அலை எந்திரவியல்
Wave packet	அலைப்பெட்டகம்
Wave vector	அலை வெக்டார்
Weldability	உருக்கி இணைக்குந் தன்மை
Welding	உருக்கி இணைத்தல்
Window	சாளரம்
Wire	மென் கம்பி
Work function	வெளியேற்று ஆற்றல்
Working formula	செயல் முறைச் சூத்திரம்
Yield point	இள்குநிலைப் புள்ளி, நெகிழ்புள்ளி:
Zone Theory	மண்டலக் கொள்கை

அச்சிட்டோர்:
கிளாசிக் பிரிண்டர்ஸ், சென்னை - 600 034
தொலைபேசி : 825 1648

விலை ரூ. 88.00